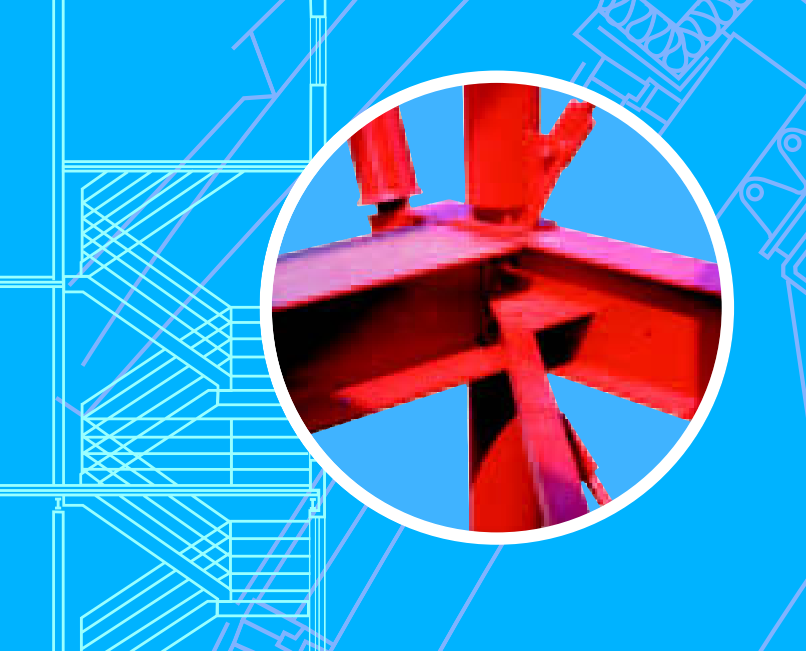
Collection *Mémentos acier*

Concevoir et **Construire** en acier

Marc Landowski

Bertrand Lemoine



Collection *Mémentos acier*

Concevoir et **construire** en acier

Marc Landowski
Bertrand Lemoine



Réalisation



Building & Construction Support
19 avenue de la Liberté
L-2930 Luxembourg
www.constructalia.com
www.arcelor.com

Auteurs
Marc Landowski
Bertrand Lemoine

Direction éditoriale
Cedam / Bertrand Lemoine
130, avenue de Versailles
F-75016 Paris France

Coordination éditoriale
Eve Jouannais

Conception graphique
Joseph Défossez

Nous remercions pour leur relecture attentive et leurs corrections judicieuses : agence Dubosc et Landowski, Thierry Braine-Bonnaire, Jean Dalsheimer, Gérard Delassus, Jean-Louis Gauliard, Patrick Le Pense, Pierre Quaquin, Bruno Théret, Loïc Thomas, Aurélien Trutt.

ISBN : 2–9523318–0–4

Nous remercions également pour leur contribution : Louis Fruitet, les éditions du Moniteur, les éditions Parenthèses, les éditions Publimétal, les Presses polytechniques et universitaires romandes, l'Otua, les sociétés Arcelor Sections Commercial, Haironville, PAB, Lafarge plâtre, Profil du Futur, Ugine & ALZ.

Avant-propos

Concevoir et construire sont les phases essentielles et complémentaires de l'acte de bâtir assurées par les maîtres d'œuvre, architectes et ingénieurs, et les entreprises. Leurs savoir-faire, leurs compétences, leurs cultures doivent s'accorder pour produire une architecture de qualité, qui réponde au mieux aux pratiques et exigences des usagers et s'insère durablement dans un environnement donné.

Concevoir et construire se font avec des matériaux et chacun d'entre eux a ses spécificités tant sur le plan conceptuel que technique, mécanique et formel. Matériau de structure, mais aussi de plancher, de façade, de couverture, de cloisonnement, d'aménagement, l'acier peut être partout présent dans un édifice et ce à des degrés très divers, en gros œuvre comme en second œuvre, suivant le désir des concepteurs et des clients. Il représente un choix déterminant dès la conception, structurel notamment, qui exige rigueur et précision mais qui donne maîtrise du projet, liberté de création et choix de solutions adaptées.

Construire avec de l'acier relève de la filière composite. C'est un matériau dont la préparation et la mise en forme se fait en grande partie en atelier et dont les éléments arrivent sur le chantier prêts à être montés et associés à d'autres matériaux. La logique de la construction avec l'acier est une logique d'assemblage, où l'ossature se fait par points porteurs de type poteaux-poutres, sur lesquels viennent se greffer les éléments de planchers, d'enveloppe et de partitions. Là aussi, l'anticipation des choix techniques permet de tirer parti au mieux des possibilités architecturales du matériau.

L'acier relève d'un univers bien spécifique avec ses familles de produits, longs ou plats, ses profilés à froid, ses pièces moulées, forgées ou mécanosoudées, ses poutres, poutrelles et poteaux en forme de H de I, de U, etc. Suivant le projet, la structure sera plane, spatiale ou encore suspendue, haubanée… Elle pourra être mixte, en acier-béton, ou tout acier, souvent associée à des façades en verre, des panneaux de bois, de béton, de plâtre… Elle peut être formée d'arcs, de poutres cintrées, de poutres en treillis, de poutres alvéolaires, de tubes et être associée à des planchers secs ou mixtes. Les portées peuvent être grandes, sans point d'appui intermédiaire, etc. L'acier se prête à toutes sortes de mises en œuvre et offre une gamme importante d'aspects. On peut même dire qu'il existe des aciers puisque l'acier inoxydable par exemple n'a pas la même composition que l'acier au carbone, et que ceux-ci se déclinent en de multiples nuances.

Dans cet ouvrage de la collection « Mémentos acier » sont abordés de manière synthétique et didactique tous les aspects importants de la construction en acier. Les qualités mécaniques de ce matériau, les possibilités techniques et formelles qu'il offre sont présentées et largement illustrées de dessins et de photographies, avec le souci constant de faire de ce manuel un outil d'aide à la conception à la fois simple et pratique, utile aux professionnels et aux étudiants.

Sommaire

1 LE MATÉRIAU ACIER

L'acier est un matériau issu de la réduction du minerai de fer ou du recyclage de ferrailles. Le fer est un élément très répandu dans l'écorce terrestre dont il représente 5 % mais on ne le trouve pas à l'état pur. Il est combiné avec d'autres éléments et mêlé à une gangue terreuse. La réduction de cet oxyde nécessite l'emploi d'un combustible : du charbon de bois jusqu'au XVIIIe siècle, puis du charbon de terre. Le métal ainsi obtenu est de la fonte qui contient 96 % de fer et 3 à 4 % de carbone et à partir de laquelle on produit de l'acier.

L'utilisation de l'acier dans la construction remonte à la fin du XIXe siècle, bien que les métaux ferreux soient connus depuis environ quarante siècles. Auparavant on employait la fonte qui peut se mouler facilement mais se révèle cassante et impossible à forger. Il faut donc l'assembler à l'aide de boulons, de vis ou de clavettes. On est progressivement passé, à partir des années 1840, de l'usage de la fonte à celui du fer puddlé, la fonte étant affinée industriellement pour obtenir du fer pur, plus souple et plus facile à laminer, à percer et à forger. Le principe des rivets posés à chaud a permis de disposer d'un mode d'assemblage universel et facile à mettre en œuvre.

C'est une cinquantaine d'années plus tard que l'acier a pu être produit de façon industrielle et s'imposer ainsi à partir des années 1890 comme le matériau de la construction métallique, avec des caractéristiques physiques bien supérieures au fer grâce à la présence de traces bien dosées de carbone et d'autres éléments chimiques. L'assemblage s'est d'abord fait avec des rivets, puis, à partir des années 1930, par la soudure ou le boulonnage. La sidérurgie n'a cessé de perfectionner les qualités de ses aciers. La masse volumique de l'acier est de 7850 kg/m^3. Un mètre cube d'acier pèse donc près de 8 t.

Les familles d'acier

On distingue les aciers dits aciers au carbone des aciers inoxydables. L'acier au carbone est aujourd'hui fabriqué par deux grandes filières d'importance à peu près égales : la filière fonte, où l'on réduit du minerai de fer dans un haut-fourneau avant passage au convertisseur pour transformer la fonte en acier, et la filière électrique, où l'on traite directement des ferrailles (voir « La fabrication de l'acier » en annexe). Dans les deux cas l'acier est « mis à nuance » dans une station d'affinage. L'acier inoxydable est quant à lui produit uniquement à partir de la filière électrique.

Les aciers de construction contiennent en général de 0,1 à 1 % de carbone. Les additions sont variables : manganèse, silicium, molybdène, chrome, nickel, titane, tungstène… En fonction de ses composants lors de la « mise à nuance » et des traitements thermiques subis par les alliages lors de leur élaboration, l'acier aura des résistances mécaniques variables. Il existe plus de 3 000 nuances d'acier.

Exemples de types d'acier

- Acier inoxydable austénitique : acier allié avec 17 % minimum de chrome, 7 % minimum de nickel, plus éventuellement du molybdène, du titane, du niobium…
- Acier inoxydable ferritique : acier allié avec 17 % à 28 % de chrome, 0,1 % maximum de carbone, éventuellement du molybdène…
- Acier inoxydable martensitique : acier allié avec 12 à 17 % de chrome, 0,1 à 1 % de carbone, éventuellement du molybdène, du nickel, du soufre…
- Acier autopatinable (Corten, Indaten, Paten…) : acier faiblement allié avec un faible pourcentage de cuivre, du nickel et du chrome.

Les formes de produits

Pour obtenir leur forme de finition et leurs caractéristiques mécaniques les aciers courants dans la construction sont :
– laminés : ce sont les produits les plus couramment utilisés dans la construction métallique. Les demi-produits sont déformés successivement au travers des laminoirs constitués par des cylindres qui compriment et étirent la masse relativement malléable en raison de sa température encore élevée. L'étape ultérieure possible est le laminage à froid. Ce procédé est principalement utilisé pour façonner des tôles minces qui sont ensuite galvanisées et/ou pré-laquées ;
– étirés ou tréfilés : par étirage ou tréfilage (à chaud ou à froid) on amène un produit déjà laminé à une section plus réduite et à une plus grande longueur pour former des barres ou des fils.

On distingue dès lors :
– les produits longs (poutrelles, palplanches, câbles, fils, ronds à béton...), obtenus par laminage à chaud, étirage ou tréfilage ;
– les produits plats (tôles, bardages, profils minces, profils creux...) qui subissent en général un laminage à froid supplémentaire, à l'exception des tôles de forte épaisseur.

Il existe aussi d'autres procédés moins courants de fabrication de pièces telles que le forgeage, le moulage...



Laminage de poutrelles.



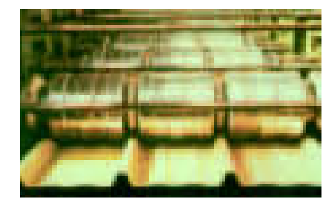
Laminage à chaud d'une bobine d'acier.

La classification des produits

Étant donné la vaste gamme de produits en acier offerte aux concepteurs, la nécessité d'une réglementation des produits sidérurgiques apparaît évidente, concernant le produit (forme, dimensions, aspect et état de surface) mais aussi sa mise en œuvre. Actuellement, l'heure est à la transition des normes nationales aux normes européennes.

La norme européenne comporte toujours les deux lettres EN (EuroNorme) précédées pour chaque pays par celles son sigle national (par exemple : NF pour la France, DIN pour l'Allemagne, BS pour la Grande-Bretagne) ; viennent ensuite de un à cinq chiffres.

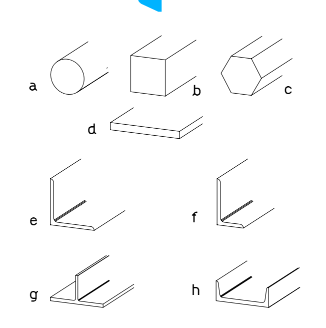
La norme indique les exigences techniques, les procédés d'élaboration, l'état de livraison, la composition chimique, les caractéristiques mécaniques et technologiques, l'état de surface.
Nous retiendrons deux types de normes :
– les normes définissant les nuances d'acier ;
– les normes spécifiques aux produits accompagnées de leur tolérance.



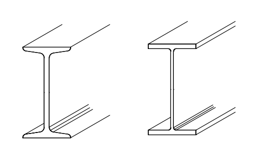
Laminage à froid d'un bardage.

Exemples de normes françaises
- NF EN 10025 : régit la fabrication des produits laminés à chaud en acier de construction.
- NF EN 10088 : pour les aciers inoxydables d'usage général.
- NF EN 10034 : sur les tolérances dimensionnelles des poutrelles IPE.

Les produits longs



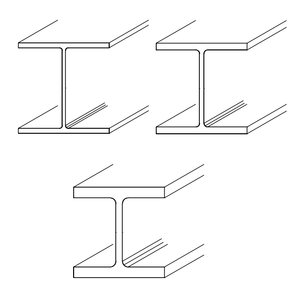
Laminés marchands :
a : rond plein
b : carré plein
c : hexagone
d : plat
e : cornière à ailes égales
f : cornière à ailes inégales
g : fer en T
h : petit U ou UPN.



Poutrelle IPN Les hauteurs vont de 80 à 600 mm.

Poutrelle IPE Les hauteurs vont de 80 à 750 mm.

Poutrelles HEA, HEB et HEM.



On distingue plusieurs sous-familles de produits longs. Certains sont directement fabriqués dans les usines sidérurgiques et sont disponibles en stock sur catalogue.

Les laminés marchands

Ce sont les ronds, les carrés, les ronds à béton, les plats, les cornières (L), les fers en T, les petits U… Tous ces produits ont une section pleine.

Les poutrelles

Les poutrelles laminées peuvent avoir différentes sections, en I, en U, ou en H. Elles conviennent aussi bien pour les poteaux que pour les poutres et sont fabriquées en différentes nuances d'acier (en général 235 ou 355 Mpa), y compris d'acier à haute limite d'élasticité (460 Mpa). Les longueurs maximales varient de 18 à 33 m suivant le profilé. Il existe différentes gammes suivant les pays : européenne, britannique, américaine, japonaise...

Les poutrelles en I

Les poutrelles en I sont de deux sortes :
– IPN : poutrelles en I normales. Les ailes sont d'épaisseur variable, ce qui entraîne des petites difficultés pour les attaches ;
– IPE : poutrelles en I européennes. Les ailes présentent des bords parallèles, les extrémités sont à angles vifs (seuls les angles rentrants sont arrondis). Les IPE sont un peu plus onéreux, mais plus commodes et sont d'usage courant.

Les poutrelles en U

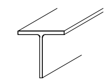
Il existe aussi deux sortes de profilés, les UPN, les UAP et les UPE. De la même façon, les UPE présentent des ailes à bords parallèles et tendent à supplanter les UPN, moins commodes à mettre en œuvre. Les hauteurs vont de 80 à 400 mm.

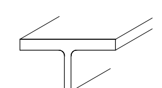
Les poutrelles HE (gamme européenne)

Elles se décomposent en trois séries : HEA, HEB et HEM, suivant l'épaisseur relative de leur âme et de leurs ailes. Leur section s'inscrit approximativement dans un carré (la semelle a une largeur sensiblement égale à la hauteur du profil jusqu'à 300 mm de hauteur). Les ailes présentent toujours des bords parallèles. Les hauteurs varient de 100 à 1100 mm (jumbos). Les profils HEA, les plus légers, présentent le meilleur rapport performance/poids en général et sont donc les plus utilisés. La progression des trois séries est intéressante techniquement et architecturalement pour des composants en pro-

longement : poteaux d'un bâtiment à étages dont la section peut varier progressivement en fonction des efforts. Du fait de l'utilisation des mêmes trains de laminage, les trois profils de même hauteur présentent la même dimension intérieure entre ailes. Les épaisseurs ne varient que vers l'extérieur. Il existe aussi des poutrelles HL (à très larges ailes), HD (poutrelles-colonnes) et HP (poutrelles-pieux).

Demi-poutrelles IPE et HE.





Les demi-poutrelles

Le découpage des poutrelles I et H suivant l'axe longitudinal a de multiples utilisations : sections T, membrures de poutres...



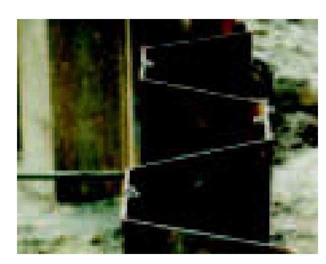
Poutrelle dissymétrique IFB.

Les poutrelles dissymétriques

Ce sont des poutres reconstituées composées soit d'un T et d'une large semelle inférieure soudée (dénommées IFB, pour Integrated Floor Beam), soit formées d'un H dont la semelle inférieure a été élargie par adjonction d'un plat (dénommée SFB, pour Slim Floor Beam). Grâce à leur aile inférieure élargie, elles sont particulièrement adaptées pour la pose de planchers préfabriqués, de coffrages en acier permettant d'incorporer la dalle dans la hauteur de la poutrelle, soit encore pour la pose de dalles alvéolaires en béton précontraint.

Les palplanches

Ces produits sont réalisés directement au laminage ou à partir de tôles profilées. La section en U ouvert est la plus courante et les palplanches sont solidarisées les unes aux autres par un joint à double recouvrement. On utilise des parois en palplanches pour contenir la poussée de talus, pour la construction de murs de quais et de ports, la protection des berges, la mise en place de blindages de fouilles et de batardeaux, l'édification de culées de pont, des parois de parkings souterrains...

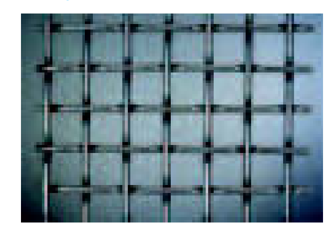


Palplanches.

Câbles et fils machine

Le fil machine est obtenu par tréfilage et étirage. En construction, il sert à fabriquer des câbles. Les fils en inox peuvent aussi être tressés ou tissés pour fabriquer des mailles de dessins variées, employées comme parements, écrans, garde-corps, faux-plafond,...

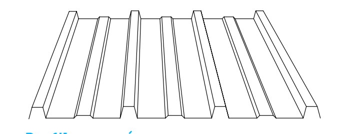
Exemple de fils d'inox tissés.



Les produits plats

Les tôles et les larges plats

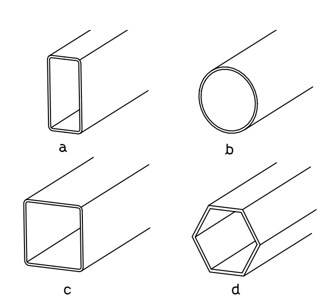
Les tôles sont fabriquées sous forme de bobines. Elles sont livrées en largeurs standards ou à la demande, mais les largeurs sont en général limitées à 1 800 mm. L'épaisseur ne dépasse pas 16 à 20 mm pour les tôles laminées à chaud et 3 mm pour les tôles laminées à froid. Celles-ci peuvent être mises en forme par profilage, pliage ou emboutissage.



Profil nervuré.

Les tôles nervurées

Ce sont des tôles minces que l'on nervure par profilage à froid à l'aide d'une machine à galets. Les tôles nervurées sont issues de bobines galvanisées et souvent prélaquées. Les applications concernent les produits d'enveloppe (bardage), de couverture (bac, support d'étanchéité) et de plancher (bac pour plancher collaborant ou à coffrage perdu), ainsi que les panneaux sandwich incorporant des matériaux isolants.



Profils creux :
a : tube de section rectangulaire
b : tube circulaire
c : tube de section carrée
d : tube de section hexagonale.

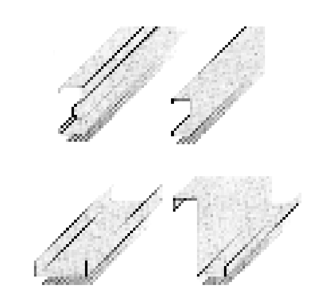
Les profils creux

Les tubes de construction sont appelés « profils creux ». Ils sont fabriqués en continu à partir de tôles minces ou moyennes repliées dans le sens de leur longueur. Les soudures sont longitudinales pour les profils creux de petits et moyens diamètres (jusqu'à 400 mm), hélicoïdales pour les diamètres plus importants jusqu'à 1 000 mm environ. Ils sont dans ce cas toujours ronds. Après soudage, la surépaisseur est rabotée pour obtenir une surface extérieure lisse.

Les profilés creux dits « de forme » sont en général formés à partir de tubes ronds : ils peuvent être carrés, rectangulaires, hexagonaux, elliptiques, voire demi-elliptiques. On fabrique aussi par extrusion des tubes sans soudure capables de plus fortes épaisseurs. Les longueurs standards sont de 6 à 15 m.

Les plaques

On parle de plaques lorsque l'épaisseur dépasse 20 mm. On peut obtenir des plaques jusqu'à 400 mm d'épaisseur et 5 200 mm de largeur. Les plaques sont principalement utilisées pour la grosse chaudronnerie ou pour les ouvrages d'art. Leur assemblage par soudure peut être complexe. Il existe aussi des plaques à épaisseur variable pour les ouvrages d'art.



Profils minces formés à froid : profil sigma, C, U et Z.

Les profils minces

Les tôles minces galvanisées (d'épaisseur inférieure à 5 mm) peuvent être profilées à froid pour réaliser des profils minces. De sections très diverses, les

profils minces sont utilisés en serrurerie, en menuiserie métallique et en ossatures légères : pannes de charpente, ossatures de murs ou de cloisons, de faux plafond... Légers et maniables, ils peuvent s'assembler par vis autotaraudeuses.

Les autres produits

Les pièces moulées

Il s'agit de pièces aux formes complexes qui sont difficilement réalisables par soudure et que l'on coule dans des moules réfractaires. Leur utilisation ne se justifie que par un effet de série ou par leur taille, comme des nœuds d'assemblage répétitifs.

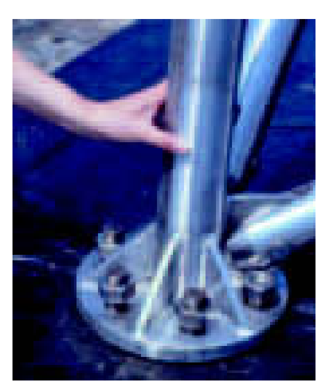

Pièce moulée pour les poteaux de la gare TGV du plateau d'Arbois, près d'Aix-en-Provence, France.

Les pièces forgées

Cette technologie concerne les pièces pleines (bielles, poteaux…) de grandes dimensions qui sont obtenues par façonnage à chaud au moyen de presses hydrauliques de grande puissance.

Les pièces mécanosoudées

Ces pièces d'attache complexes sont composées à partir d'éléments standards (plats, cornières, profils…) soudés entre eux. Elles constituent une alternative économique aux pièces moulées.


Pied de poteau mécanosoudé.

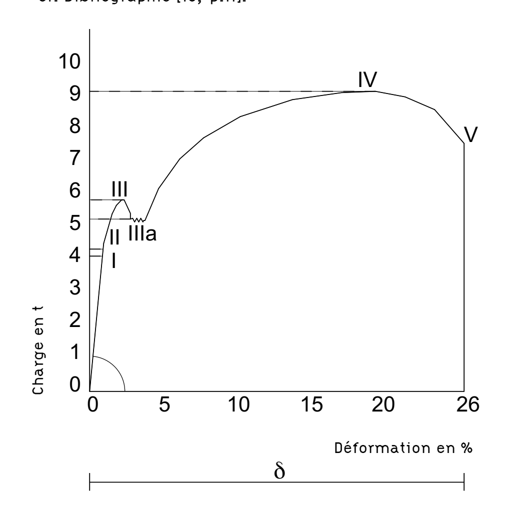
2 LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DE L'ACIER

Toute structure subit des sollicitations ou actions extérieures qui provoquent des déformations, mais aussi des efforts internes, à savoir les contraintes. Les contraintes sont principalement de cinq natures différentes :
– la traction ;
– la flexion ;
– la compression et le flambement ;
– le cisaillement ;
– la torsion.

Il reste par ailleurs d'autres phénomènes mécaniques ou efforts extérieurs à prendre en compte :
– la résistance à la « rupture fragile » (résilience) ;
– la fatigue.

Enfin, certaines sollicitations particulières sont à prendre en compte :
– les variations de température ;
– les sollicitations dynamiques.

Diagramme charge-déformation de l'acier montrant le comportement réel de l'acier (Schaper, 1994).
Cf. Bibliographie [10, p.11].



E = module d'élasticité

I : limite de proportionalité
II : limite d'élasticité
III et IIIa : limite supérieure et inférieure d'écoulement
IV : charge ultime
V : charge à la rupture
δ allongement à la rupture

NB : Valeur pour une barre en acier de 2,24cm² de section.

La traction

Phase élastique

Soumise à une traction suivant sa section, une barre en acier s'allonge uniformément jusqu'à une certaine limite, appelée limite d'élasticité. Il y a réversibilité du phénomène : si la charge est supprimée, la barre d'acier reprend sa dimension initiale (loi de Hooke). C'est la phase dite « élastique » (phases I et II sur le diagramme).

Phase plastique

Au-delà de la limite d'élasticité, l'allongement de la barre augmente même si la charge évolue peu, puis passe par une phase de déformation plastique où une partie de l'allongement demeure permanent si la charge diminue. Ce phénomène est appelé écrouissage. L'allongement demeure permanent (phases III et IV).

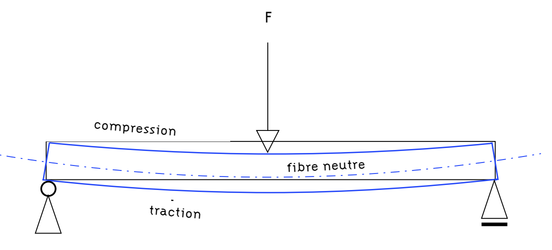
Phase de rupture

Après une phase d'allongement, la charge diminue car la section d'acier diminue. Ce phénomène est appelé « striction ». Il y a alors rupture de la barre, la déformation totale est appelée « allongement à la rupture » (phase V).

Dans une construction, les pièces de charpente sont conçues et calculées pour rester la plupart du temps dans le domaine élastique. La limite d'élasticité pour un acier ordinaire est de 235 Mpa (235 N/mm^2) ou de 355 Mpa. Pour un acier à haute limite d'élasticité, cette valeur peut s'élever à 460 Mpa, voire 690 Mpa (aciers thermomécaniques).

La flexion

Considérons une poutre horizontale appuyée à ses deux extrémités et supportant un poids placé au milieu de sa portée. La force extérieure F exercée sur la poutre par la charge qu'elle supporte est perpendiculaire à son axe longitudinal. Elle génère ce qu'on appelle une flexion ou un moment fléchissant.



Flexion générée par l'effort F : la partie supérieure de la poutre est comprimée, la partie inférieure est tendue.

La poutre se déforme pour produire une réaction qui équilibre le système. Contrairement à la traction où la section du matériau est soumise à une contrainte uniforme, la flexion exerce de part et d'autre de la fibre neutre des contraintes variables et de signes opposés. La face supérieure de la poutre se raccourcit sous un phénomène de compression et la face inférieure s'allonge sous un phénomène inverse de traction.

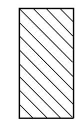
La variation des contraintes de la face supérieure à la face inférieure, de la compression à la traction, définit un axe d'équilibre appelé axe neutre dans lequel la contrainte est nulle. La matière au voisinage de cet axe joue un rôle négligeable dans la résistance de la poutre. En revanche, la matière au voisinage des faces extérieures de la section est la plus sollicitée. Elle joue donc un rôle essentiel dans la résistance de la poutre. La géométrie de la section des poutres et des poteaux est directement issue de ces constatations. Elle conduit à concentrer la matière dans les parties les plus éloignées de l'axe neutre.

La résistance de la poutre dépendra donc de la caractéristique géométrique suivante de la section : le module de flexion, à savoir le rapport du moment d'inertie de la poutre sur la distance de la fibre neutre à l'extrémité de la section, soit I/v. Plus le module de flexion est grand, meilleure est la résistance à la flexion.

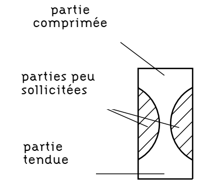
Les profils en I sont directement issus de cette considération. Sous l'effet d'un chargement en flexion l'âme sert à écarter l'aile supérieure entièrement comprimée de l'aile inférieure entièrement tendue.

À noter que les déformations de la poutre en flexion sont liées à l'inertie et que c'est souvent le critère de déformation et non celui de résistance qui est prépondérant dans la détermination des sections en construction métallique.

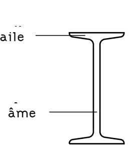
Optimisation de la section d'une poutre fléchie : de la section rectangulaire au profil en I.



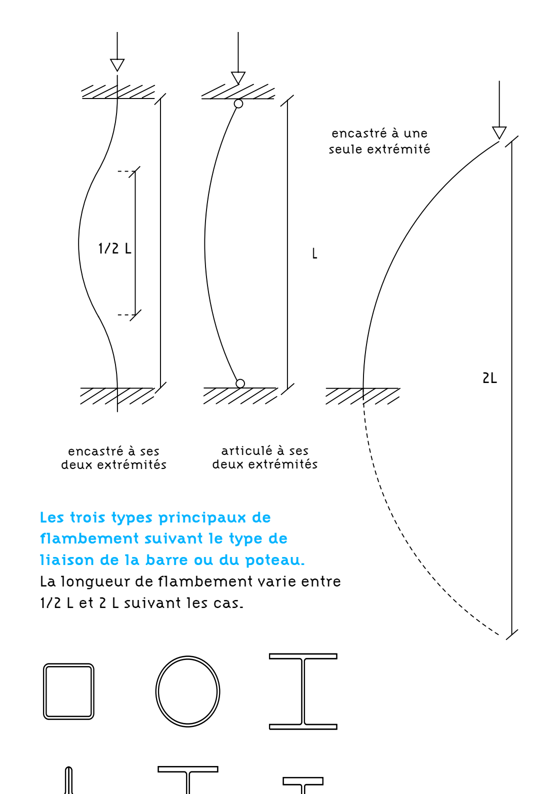
a) Section rectangulaire



b) Section montrant les parties sollicitées en flexion. La poutre est peu sollicitée au voisinage de l'axe neutre



c) Profil optimisé en I



Les trois types principaux de flambement suivant le type de liaison de la barre ou du poteau.
La longueur de flambement varie entre 1/2 L et 2 L suivant les cas.

Exemples de profils creux et de profils ouverts pour des poteaux.

La compression et le flambement

Les déformations dues à la compression ne jouent pas toujours un rôle déterminant sur les éléments de structure verticaux. En revanche, un phénomène d'instabilité appelé « flambement » apparait à partir d'une certaine charge et en fonction du rapport existant entre la section et la hauteur de l'élément considéré. Le flambement est une forme d'instabilité propre aux éléments comprimés élancés tels que les poteaux, colonnes, barres comprimées.

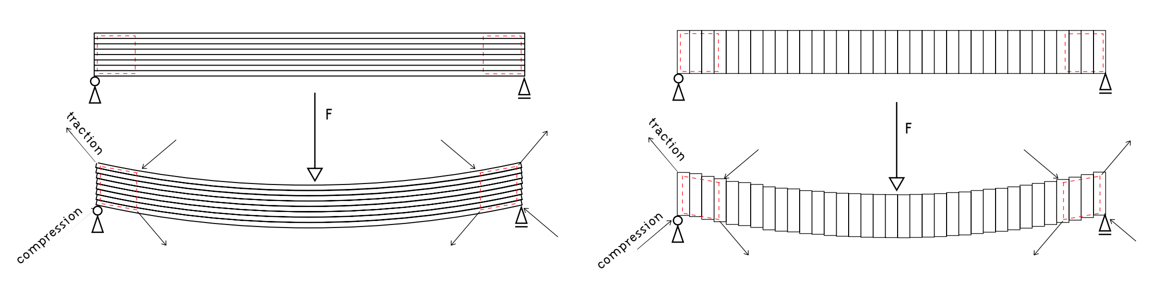
Le flambement est possible suivant les deux axes principaux de la section de l'élément. Si les conditions d'appuis sont les mêmes selon ces deux axes, le flambement se fera suivant l'axe présentant l'inertie la plus faible.

Comme pour les phénomènes de flexion, la section de la barre comprimée va jouer un rôle déterminant pour le choix du profil économique. Le profil idéal du point de vue du flambement sera donc le tube rond, profil creux dont la matière est économisée au maximum et dont l'inertie est maximale dans toutes les directions. Les profils en H permettent aussi une bonne répartition de la matière.

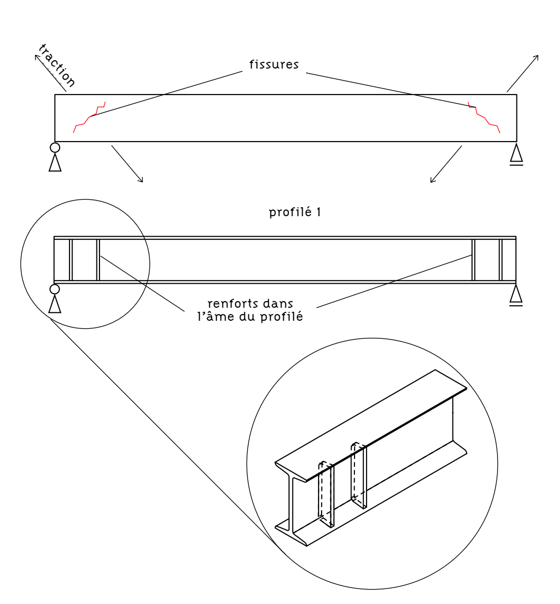
Le cisaillement ou effort tranchant

L'analyse des contraintes de compression, de traction et de flexion ne suffit pas pour décrire complètement le comportement des matériaux.

Schémas décomposant la traction et la compression dans une poutre fléchie et montrant le phénomène de cisaillement longitudinal et transversal.



En effet, si on considère une poutre comme un empilement de strates, celles-ci ont tendance à glisser les unes par rapport aux autres sous l'effet de la flexion. On peut décrire le même phénomène si l'on découpe la poutre en strates assemblées verticalement.
La flexion simple s'accompagne ainsi d'un cisaillement horizontal et d'un cisaillement vertical. Le cisaillement est plus important au droit des appuis car il augmente avec la variation de la flexion. Le cisaillement vertical, ou effort tranchant, peut s'interpréter comme un effort résultant de deux forces parallèles de sens opposés.



Effort tranchant au droit des appuis
Schémas montrant d'une part, une poutre en béton armé sur laquelle peuvent apparaître des fissurations provoquées par l'effort tranchant en cas de chargement vertical et, d'autre part, la solution proposée en construction métallique qui consiste à mettre des renforts au droit des appuis pour parer à ce type de problème.

La torsion

Au cas où le point d'application d'une force se trouve en dehors d'un plan passant par l'axe neutre d'un élément de structure, une autre sollicitation est générée : la torsion. Ceci correspond à l'effet d'un couple de forces dont l'axe de rotation et l'axe neutre de la poutre sont confondus. L'expérience et la théorie montrent que les profils creux sont plus rigides en torsion que les profils ouverts. Il est préférable d'éviter de faire travailler les ossatures en torsion.

La résistance à la « rupture fragile »

L'appréciation de la résistance de l'acier au choc se fait par un essai conventionnel dit « de flexion par choc sur éprouvette bi-appuyée », que l'on appelle essai « de résilience ». Plus le niveau d'énergie nécessaire pour rompre l'éprouvette est important, plus l'acier est résistant. L'énergie augmente quand la température augmente.

Le phénomène dit de « rupture fragile » est susceptible de se produire lorsqu'il y a un défaut, une fissure, ce qui arrive plus fréquemment quand le produit est d'une épaisseur supérieure à 10 mm. Il peut aussi apparaître lorsque la température s'abaisse, exception faite des aciers inoxydables.

Afin de réduire ce risque, il faut évidemment utiliser des aciers conformes aux normes. Mais il faut aussi pour les détails constructifs assurer un changement progressif des épaisseurs, meuler les pieds de cordon de soudure, en bref, assurer une meilleure circulation des efforts sans changement brusque de direction, pour éviter des concentrations de contraintes.



La fatigue devient parfois le critère dimensionnant pour des ouvrages d'art.
C'est la cas des ponts du TGV qui sont soumis à répétition à des charges alternées pendant une longue durée (120 ans). Ici le viaduc de Mondragon sur le Rhône pour le TGV Méditérranée, Jean-Pierre Duval, architecte.

La fatigue

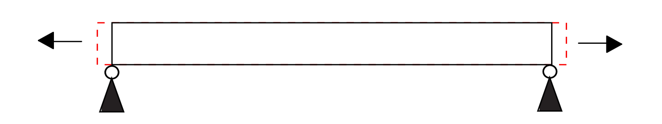
Soumis à des efforts répétés alternés, tout matériau peut se fissurer et se rompre, alors que l'effort appliqué n'entraîne pas de contrainte supérieure à la limite de rupture. On parle de « fatigue ».

Prenons par exemple le cas d'un fil de « fer » que l'on tord dans un sens puis dans l'autre. En répétant l'opération un certain nombre de fois on finit par engendrer sa rupture. Afin d'éviter ce phénomène, on définit pour les éléments et assemblages soumis à des efforts alternés cycliques une contrainte limite à ne pas dépasser et donc les efforts maximums que l'on peut appliquer. Cette contrainte limite qui a été déterminée expérimentalement, est bien inférieure à la limite d'élasticité.

Dans le cas d'une poutre qui a été conçue pour résister à un moment de flexion M, elle ne résistera pas indéfiniment à un moment alterné dont le maximum est M. Il y aura rupture au bout d'un certain nombre de cycles. Pour éviter cela, le moment alterné ne devra pas dépasser un maximum de 0,4 M à 0,5 M.

Les variations de température

Comme tous les matériaux, l'acier se dilate sous l'effet de l'augmentation de la température. Ce phénomène est réversible dans les conditions usuelles. Le coefficient de dilatation linéaire de l'acier est égal à $1,22 \times 10^{-5}$ /°C à température ambiante.



Dilatation d'une poutre
Pour une pièce métallique de 12 m de longueur, une augmentation de température de 30 °C provoque l'allongement suivant :
$1,22 \times 10^{-5} \times 30 \times 12 = 4.4 \times 10^{-3}$ m
= 4,4 mm
À souligner que si la pièce était bridée, c'est-à-dire si la pièce ne pouvait se dilater librement, une contrainte de 77 Mpa apparaîtrait ici.

Par ailleurs, plus la température est élevée plus la limite d'élasticité et la résistance à la traction diminuent et plus la plasticité augmente. On distingue un seuil de 500 °C environ en dessous duquel les variations sont faibles, et au-dessus duquel l'acier commence à perdre ses capacités de résistance mécanique. Il faut donc essayer de maintenir l'échauffement des éléments dans des limites tolérables, c'est-à-dire en dessous de 500 °C, et éviter de trop brider la structure.

Les sollicitations dynamiques

Les structures peuvent être soumises à des chargements variant dans le temps, générés par des phénomènes tels que le vent, les charges roulantes, les séismes, la houle, les mouvements de foule,... De même qu'avec des charges permanentes, une structure va réagir aux excitations dynamiques.

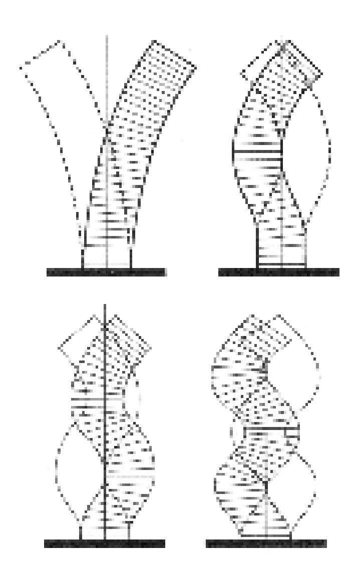
Le cas des séismes

Dans le cas particulier d'un séisme, les ondes engendrent des vibrations dans le sol qui provoquent le déplacement des constructions. Les bâtiments vont alors s'opposer à leur mise en mouvement en donnant naissance à des forces d'inertie Fi qui s'opposent au mouvement. Chaque masse m attachée à la structure communiquera une force d'inertie : Fi = m.g, où g représente l'accélération. Les charges sismiques doivent donc être équilibrées avec ces forces d'inertie et les efforts dissipés sous forme d'énergie, de manière à assurer l'équilibre dynamique et ainsi éviter toute rupture.

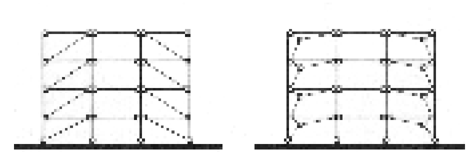
Pour illustrer cette idée, nous pouvons prendre comme exemple le cas, pratiquement similaire, d'un homme debout sur un tapis roulant à l'arrêt. Si l'on met en marche subitement le tapis roulant, l'homme sera déstabilisé et projeté en arrière en subissant une force d'inertie Fi proportionnelle à sa masse.

Pour comprendre les mécanismes du comportement des bâtiments face aux séismes, nous devons garder à l'esprit que la réponse du bâtiment dépend de ses caractéristiques propres.

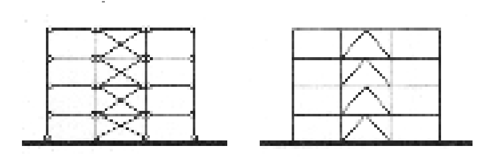
Pour améliorer la résistance d'une construction aux séismes, il est préférable :
– de minimiser l'action des forces d'inertie en optant pour des matériaux légers tels que l'acier ;
– d'augmenter la capacité de réaction de la structure ;
– d'améliorer la capacité de stockage et de dissipation de l'énergie dans la construction, en utilisant un matériau de structure ductile et un système hyperstatique ;
– de concevoir des bâtiments avec des élancements modérés, une symétrie selon les deux axes, un centre de gravité bas, peu de niveaux ouverts et de porte-à-faux importants ;
– d'adapter la conception de la structure (souple ou rigide) aux caractéristiques du sol des fondations (ferme ou meuble). Les périodes propres du bâtiment et du sol doivent être les plus éloignées possibles pour éviter les phénomènes de résonance.



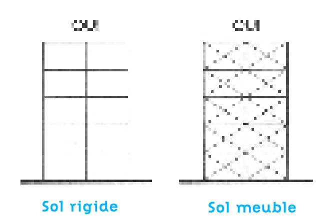
Modes d'oscillation horizontale des bâtiments à étages. Au-delà du mode fondamental (en haut à gauche), il existe schématiquement autant de modes d'oscillation qu'il y a d'étages.



Exemples de contreventements par tirants.



Exemples de palées de stabilité triangulées : contreventement en X par diagonales rigides (à gauche) ; ossature contreventée à nœuds rigides (à droite).



Choix du système porteur : ossature flexible sur sol rigide (à gauche) ; ossature rigide sur sol meuble (à droite).

3 LA CONCEPTION GÉNÉRALE DE LA STRUCTURE

L'architecte

La détermination, la hiérarchisation et la résolution des contraintes techniques s'effectuent en fonction des contraintes liées au programme et d'un choix architectural déterminé par l'architecte avec l'ingénieur. La conception originelle d'un projet, fonctionnelle et esthétique, doit nécessairement intégrer une réflexion sur le type de structure envisagé. Tout au long du processus de conception, l'architecte travaille généralement en collaboration avec un bureau d'études ou des ingénieurs-conseil spécialisés dans un domaine (structure, thermique, acoustique…).

Le bureau d'études

Le travail de l'ingénieur spécialisé en structures métalliques consiste à déterminer et établir, en relation suivie avec l'architecte :
– les efforts ou actions qui s'appliquent à la structure ;
– la stabilité de l'ouvrage mais aussi la forme structurelle optimale de l'ouvrage. Le choix du matériau de structure est également effectué à ce moment ;
– les réactions aux appuis qui découlent des actions exercées. La descente de charges constitue le document de synthèse de ce travail ;
– les sections requises pour chaque partie de l'ossature de manière à assurer la sécurité de la structure. La question de l'assemblage est également développée. Plusieurs combinaisons d'efforts ou cas de charges sont envisagées. La note de calcul est le document qui rassemble ces éléments.
Les bureaux de contrôle interviennent pour vérifier les plans et les documents présentés par l'architecte et le bureau d'études.

Montage de la structure acier d'un immeuble de bureaux. Campus Verrazano à Lyon. Sud Architectes.



L'entreprise

Dès lors que l'appel d'offre est lancé sur la base de l'avant-projet détaillé (APD), la consultation des entreprises se fait auprès d'une entreprise générale ou en lots séparés. Les études de l'entreprise de construction métallique concernent la structure qui va être réellement construite, en passant par la préparation du travail dans les ateliers de fabrication, la phase intermédiaire de montage pour finir à la structure dans son positionnement final. À noter que la fabrication ne commence qu'après les études d'exécution et les approvisionnements, et qu'elle nécessite la coordination de deux plannings :
– le planning général de construction du chantier, connu et maîtrisé par l'architecte et la maîtrise d'œuvre dans son ensemble ;
– le planning de l'atelier de fabrication, généralement inconnu de la maîtrise d'œuvre, qui concerne l'ensemble des travaux à destination de divers chantiers.
Il y a donc un délai à prendre en compte entre le lancement des études pour l'entreprise et le montage. Par la suite, la phase de montage est la plupart du temps très rapide.

Les efforts appliqués à la structure

Les structures en acier qui assurent la stabilité d'un bâtiment reprennent des charges liées à trois composantes d'un bâtiment :
– sa composition : les charges permanentes ;
– sa localisation : les surcharges climatiques et sismiques éventuelles ;
– son type d'utilisation : les charges d'exploitation.

Il existe une grande diversité de règles et de normes relatives aux actions exercées sur les structures de bâtiment. L'Eurocode 1 règlemente les actions qui sont appliquées aux structures.

Charges permanentes

Elles comprennent le poids propre de la structure, le poids des planchers, le poids des parois intérieures – minces et épaisses – le poids des façades, le poids de la couverture, de l'étanchéité…

Poids surfacique de divers éléments

Éléments de structure en acier (*par niveau*)	30/60	daN/m^2
Charpente métallique (*fermes, pannes, chevrons*)	20/40	daN/m^2
Couverture acier inoxydable (*compris voligeage, lattis, feuillure*)	25	daN/m^2
Couverture tôle ondulée galvanisée (*compris voligeage*)	15/20	daN/m^2
Panneaux sandwich	12/15	daN/m^2
Bardage simple peau	8/10	daN/m^2
Bardage double peau	20/25	daN/m^2
Structure secondaire	8/10	daN/m^2
Bac acier (matériau seul)	8/10	daN/m^2
Cloisons	10/20	daN/m^2

Charges occasionnelles

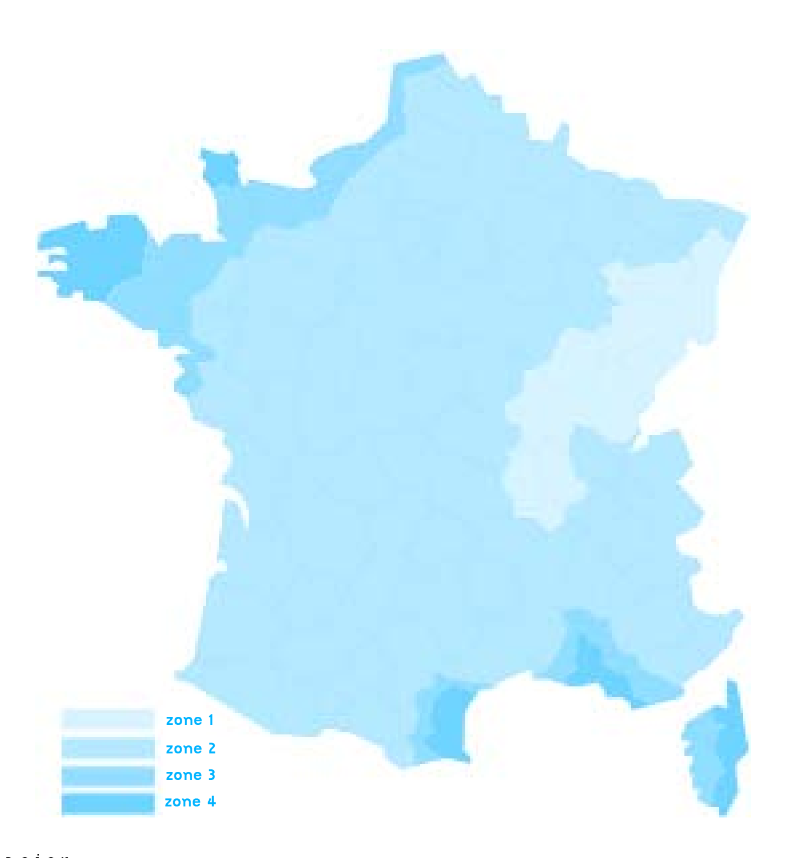
Il y a aussi d'autres types d'actions occasionnelles ou accidentelles :
– les actions de nature géologique (séisme, poussée des terres) ;
– les chocs accidentels ;
– les déplacements imposés, les tassements d'appui ;
– les efforts de précontrainte ou de dilatation ;
– les charges liées à des phases provisoires de montage ;
– les actions liées à l'incendie déclenchées de manière accidentelle, etc.

L'ensemble de ces actions est évalué et pris en compte par les bureaux d'études techniques. L'entreprise en tient également compte lors de la phase chantier.

Charges climatiques

Le vent

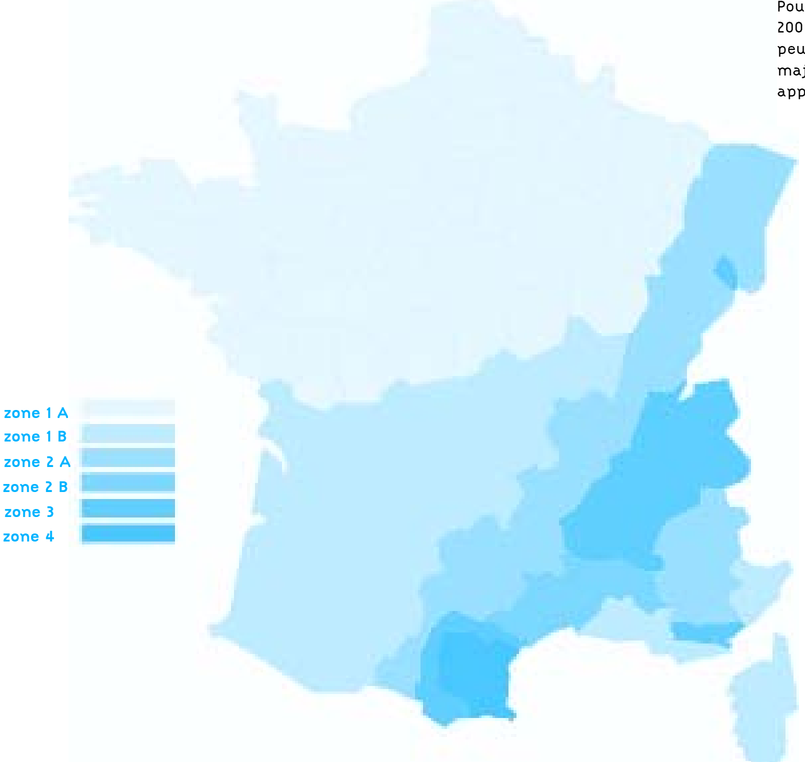
D'après les règles NV65/99, La France est divisée en quatre régions plus ou moins ventées. Les paramètres à incorporer au calcul de la charge surfacique exercée par le vent sont l'effet de site (site protégé, normal, exposé), l'effet de masque, l'effet des dimensions. On distingue par la suite les actions exercées à l'extérieur du bâtiment, puis les actions exercées de l'intérieur. La forme de la toiture, l'effet de rive, le fait que le bâtiment soit ouvert ou fermé et le fait qu'il y ait des décrochements en élévation ou en plan influent également sur la valeur à prendre en compte localement. Pour les formes complexes, on procède à des essais en soufflerie avec des modèles réduits. Les résultats obtenus permettent de faire des extrapolations sur le modèle réel.
Les règles NV 65/99 seront remplacées à terme dans les Eurocodes par l'EN 1991-1-4 (actuellement ENV 1991-2-4).



Vent – Carte des pressions dynamiques à prendre en compte suivant les régions de France, définies par la norme NV 65/99 (entre parenthèses les valeurs pour les sites exposés) :
Zone 1 : 50 daN/m^2 (67,5 daN/m^2)
Zone 2 : 60 daN/m^2 (78 daN/m^2)
Zone 3 : 75 daN/m^2 (93,8 daN/m^2)
Zone 4 : 90 daN/m^2 (108 daN/m^2)

La neige

Selon les règles Neige et Vent NV65/99 et les règles N84/95 pour les marchés publics, la charge surfacique de base de la neige varie suivant six zones géographiques. L'altitude et la pente des toitures influent également sur la valeur à prendre en compte.
Les règles N84 et NV 65 seront remplacées à terme dans les Eurocodes par l'EN 1991-1-3 (actuellement ENV 1991-2-3).



Neige – Carte des charges de neige à prendre en compte suivant les régions de France, définies par la norme NV 65/99 (entre parenthèses les valeurs pour les surcharges extrêmes et les charges accidentelles) :
Zone A : 35 daN/m^2 (60)
Zone B : 35 daN/m^2 (60 et 80)
Zone 2 A : 45 daN/m^2 (75 et 80)
Zone 2 B : 45 daN/m^2 (75 et 108)
Zone 3 : 55 daN/m^2 (90 et 108)
Zone 4 : 80 daN/m^2 (130 et 144)
Pour des altitudes comprises entre 200 et 2000 m, les valeurs de base peuvent être majorées. D'importantes majorations doivent aussi être appliquées en montagne.

Surcharges d'exploitation

Les surcharges dites d'exploitation ou d'utilisation sont évaluées en fonction :
– du poids des personnes ;
– du poids du mobilier et des cloisonnements spécifiques ;
– des véhicules et de leur mouvement (dans le cas de parkings en superstructure, des ponts...).

Ces charges ou ces surcharges produisent des forces qui se traduisent en actions sur la structure. Elles peuvent être concentrées ou uniformément réparties. Les valeurs des charges à prendre en compte sont déterminées à partir de la norme NF P 06-001. Elle sera remplacée à terme dans l'Eurocode par l'EN 1991-1-1 (actuellement ENV 1991-2-1).

Surcharges d'exploitation uniformes

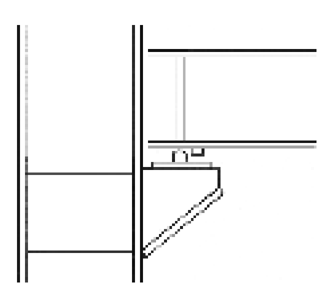
Logements	150	daN/m^2
Bureaux	250	daN/m^2
Bâtiments scolaires (salles de classe)	250	daN/m^2
Bâtiments hospitaliers et dispensaires (chambres)	150	daN/m^2
Archives	500	daN/m^2
Bâtiments à usage sportif	500	daN/m^2
Bâtiments à usage sportif (places debout)	600	daN/m^2
Bâtiments industriels	300/500	daN/m^2
Escaliers et passerelles dans locaux industriels	200	daN/m^2
Parkings	250	daN/m^2

La stabilité de l'ouvrage

L'équilibre

L'équilibre définit un état et une position de la structure où l'ensemble des forces qui sont appliquées se composent de manière à ce que la force résultante soit nulle. On distingue les actions qui sont les efforts exercés sur la structure, des réactions qui sont les efforts exercés par les appuis sur la structure. La résultante des actions et celle des réactions doivent s'équilibrer, tant du point de vue des forces que de celui des moments.

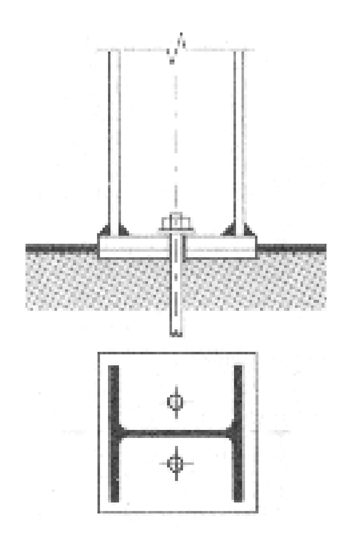
L'équilibre peut être stable ou instable. Dans le cas d'un équilibre stable, une modification légère des actions exercées sur la structure entraîne un changement temporaire de la position de la structure, mais celle-ci tend à revenir vers sa position initiale. C'est ce type d'équilibre qui concerne la conception de structure.



Appui simple à dilatation poutre sur poteau.

Les liaisons entre éléments

Une partie d'une structure donnée est toujours reliée avec un ou plusieurs autres éléments, que ce soit une autre partie de la structure ou le sol. Les conditions de liaison (ou d'appui) définissent les mouvements bloqués et par là même les réactions qui peuvent apparaître. Il y a six degrés de liberté pour une extrémité de barre dans l'espace : trois degrés de translation et trois degrés de rotation. Dans le plan, il y a trois degrés de liberté, deux de translation et une de rotation.
Parmi les nombreux types de liaison entre les éléments constructifs, on peut distinguer trois grandes familles.



Pied de poteau articulé. Bien que la platine soit fixée par deux boulons, ce type d'appui est considéré comme articulé. Cf. Bibliographie [12, p.60].

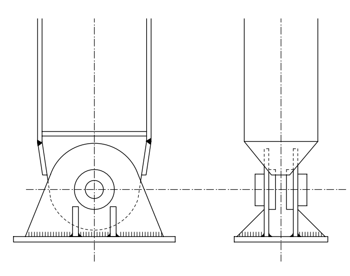
L'appui simple

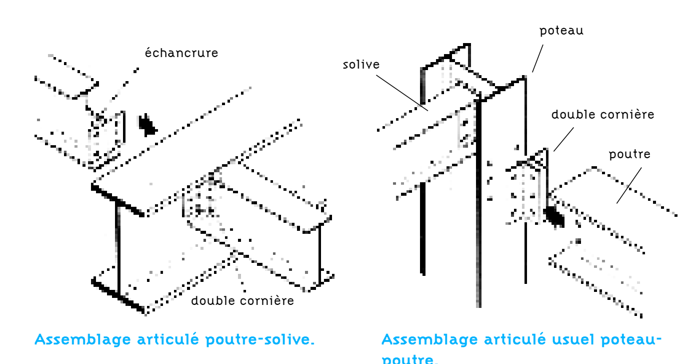
Ce type d'appui bloque une translation suivant une direction et n'admet donc que des charges suivant cette direction. Le cas le plus classique est la poutre ou le poteau qui repose sur une maçonnerie avec interposition d'une semelle ou d'un sommier de répartition. L'appui peut comporter une possibilité de glissement pour prendre en compte la dilatation (tels que des rouleaux). Ce type d'appui est couramment utilisé dans les ponts de grande portée.

L'articulation ou la rotule

Dans le plan, l'articulation bloque les deux translations possibles et autorise la rotation. L'élément peut pivoter autour d'un axe. L'articulation exerce donc une force de réaction qui est composante de deux vecteurs parallèles aux deux translations bloquées. Dans l'espace, la rotule cylindrique permet une rotation autour d'un seul axe, les cinq autres degrés de liberté sont bloqués. La rotule sphérique quant à elle permet les trois rotations, les trois translations étant bloquées. Elle est peu utilisée.

Appui articulé d'un poteau sur un massif en béton. L'articulation se fait au moyen d'une rotule.





Assemblage articulé poutre-solive.

Assemblage articulé usuel poteau-poutre.

L'articulation simplifie le calcul des structures car elle empêche la transmission des moments de flexion (valeur nulle du moment à l'articulation), facilite leur montage et permet aux structures de mieux prendre en compte les petits mouvements (dilatations, tassements différentiels…). On classe dans la catégorie des articulations les appuis de poteaux de faible section comportant une semelle et deux boulons de scellement.

L'encastrement

L'encastrement que l'on appelle aussi « nœud rigide » interdit tout mouvement de translation ou de rotation au point d'appui. Une liaison par encastrement rend solidaire les éléments. Elle est plus efficace mais introduit des contraintes supplémentaires à prendre en compte. C'est le cas d'une poutre métallique scellée dans un massif en maçonnerie ou des assemblages par boulons (au moins quatre) ou soudures.

plaque frontale
fourrure
solive
poutre

Assemblage rigide poutre-solive.

poteau
plaque frontale débordante
poutre

Assemblage rigide usuel poteau-poutre.

Cf. Bibliographie [12,p.139, 140 et 142].

La stabilité dans le plan

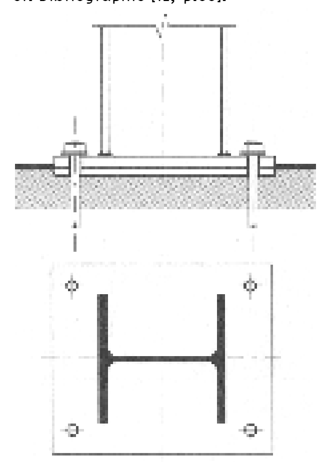
Une fois l'équilibre et les liaisons définis, il est relativement aisé d'apprécier si une structure est stable ou non. Par la suite, il sera possible d'apprécier si les appuis de la structure sont absolument indispensables à la stabilité ou non.

Triangulation

En prenant le cas d'une structure articulée fermée à trois éléments, on est en équilibre et on remarque que « le triangle est indéformable » d'un point de vue géométrique. En soumettant un triangle articulé à ses trois nœuds à des efforts appliqués aux nœuds, il n'apparaît que des efforts de compression et de traction au sein des barres. Il n'y a pas de flexion parce que les nœuds sont articulés.

En prenant le cas de trois barres articulées entre elles et ouvertes, c'est-à-dire d'un cadre articulé, on peut dire sans le moindre calcul que la structure est instable. La triangulation est donc un moyen de stabiliser la structure et de rigidifier un plan.

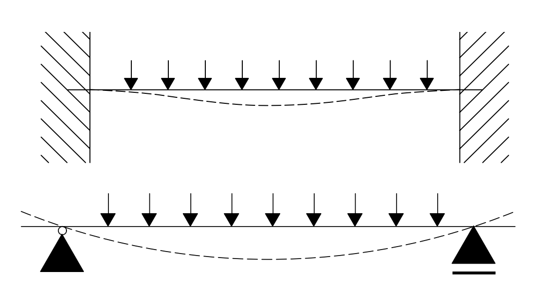
Pied de poteau encastré fixé par quatre boulons.
Cf. Bibliographie [12, p.60].



Il existe d'autres moyens de rigidifier un cadre :
– la rigidification d'un ou plusieurs nœuds ;
– le remplissage du cadre articulé.

Structures isostatique et hyperstatique

Une structure est isostatique lorsqu'on a atteint le niveau minimal de degrés de liberté bloqués requis pour l'équilibre de la structure. En ajoutant un degré de liberté supplémentaire à une telle structure, on entraîne son instabilité. En renforçant au contraire ses conditions d'appui, c'est-à-dire en bloquant en fait un degré de liberté supplémentaire, on obtient une structure plus stable que l'on qualifie d'hyperstatique.



Systèmes isostatique et hyperstatique
Dans le cas courant d'une poutre uniformément chargée, la flèche d'une poutre encastrée à ses deux extrémités (système hyperstatique) est cinq fois plus faible que celle d'une poutre simplement posée sur ses appuis (système isostatique). Autrement dit, pour une même quantité de matière, le système hyperstatique est de loin le plus efficace.

Plus généralement, une structure est isostatique s'il y a instabilité lorsqu'on articule un de ses élément ou qu'on en enlève un. Les appuis et liaisons d'une structure isostatique se limitent alors aux seuls nécessaires. En revanche, s'il y a des appuis excédentaires, la structure est hyperstatique.

Cependant, en matière de structure, il n'y a pas de solution parfaite mais des solutions plus appropriées que d'autres en fonction des situations auxquelles il convient de répondre. La surabondance des liaisons rend le système hyperstatique plus rigide et plus tolérant à une redistribution des efforts en cas d'endommagement. En revanche, toute déformation dans sa géométrie – telles que celles liées aux dilatations thermiques, aux mouvements différentiels des appuis, etc. –, crée des contraintes supplémentaires qui se répercutent à l'intérieur du système et que celui-ci devra pouvoir prendre en compte. Les contraintes de montage peuvent aussi orienter le choix du système.

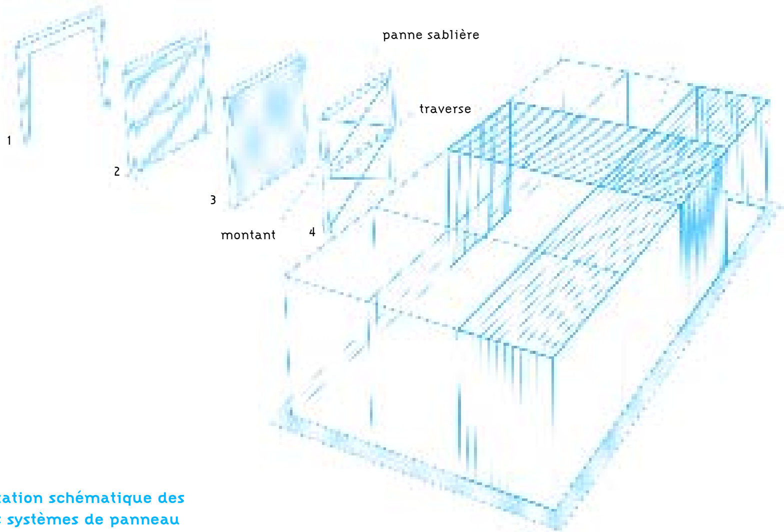
La stabilité dans l'espace - Contreventement

Assurer la stabilité d'une structure spatiale consiste à la rendre stable suivant au moins trois plans, dans deux directions non parallèles et suivant ses plans horizontaux. On cherche à faire transiter les efforts par des plans rigides pour les faire cheminer jusqu'aux appuis.

Parmi les différentes forces ou charges dynamiques qui transmettent des efforts horizontaux, on peut citer :
– le vent sur les façades ;
– les engins roulants ;
– les véhicules dans les parkings (les véhicules accélèrent et freinent, et génèrent par conséquent des efforts horizontaux) ;
– les séismes ;
– le feu.

Poutre triangulée dans un pont suspendu (ici le Golden Gate à San Francisco).





Représentation schématique des différents systèmes de panneau de contreventement :
On distingue quatre types de contreventement : en façades (long pan et pignon) et en toiture (longitudinal et transversal), représentés sur la figure principale. La rigidité en cisaillement est conférée à un panneau (de gauche à droite) par rigidification des nœuds de l'ossature pour créer un cadre portique (1), par un diaphragme en tôle d'acier (2), par un remplissage pour créer un voile en béton armé (3) ou par triangulation pour créer un contreventement en treillis (4).
Cf. Bibliographie [12, p.68].

Contreventement par des croix de Saint-André. Foyer SNCF, Paris 12e. Dubosc et Landowski architectes.



Du fait que le vent est l'action de type horizontal qui est la plupart du temps prépondérante, les dispositifs de stabilité sont aussi appelés dispositifs de contreventement. Si la question de la stabilité est en général très bien perçue pour ce qui concerne les charges ou actions verticales, il en va tout autrement pour ce qui est des charges horizontales.

En pratique, par mesure de sécurité, on prévoit toujours au moins deux dispositifs de contreventement dans deux plans verticaux non parallèles. Le contreventement vertical peut se faire par des voiles en béton armé ou par des palées de contreventement. Le contreventement horizontal est réalisé par les planchers, les toitures ou par des poutres au vent. Les contreventements verticaux doivent être situés impérativement à tous les étages de manière à permettre aux efforts horizontaux de redescendre jusqu'aux fondations. Cependant, ils ne sont pas nécessairement superposés.

En construction métallique, le dispositif de contreventement est en général réalisé par la stabilisation ou la rigidification de l'élément de base qui est le cadre articulé. Trois types de procédé permettent de rendre indéformable un cadre.

Le remplissage du cadre par un élément rigide dans son plan

Dans le cas d'un contreventement vertical, il peut s'agir d'un mur en béton ou en maçonnerie lié à la structure métallique. Dans le cas d'un contreventement horizontal, ceci peut correspondre à une dalle de plancher en béton.

La triangulation par des diagonales

L'installation dans un cadre d'une diagonale permet de le rigidifier. Pour assurer la stabilité du panneau dans les deux sens, il conviendra de tenir compte de la résistance à la compression de la diagonale (profil creux par exemple) ou de disposer une autre diagonale inversée dans le même panneau (contreventement en croix de Saint-André).

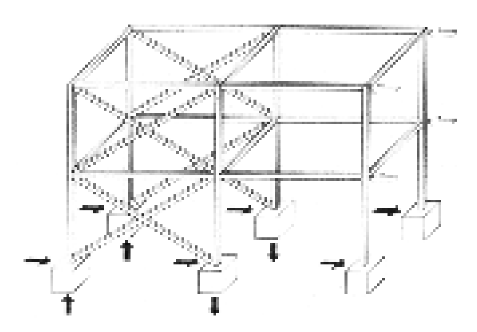
Toute forme de triangulation est admissible si les barres travaillant en compression résistent au flambement. Dans le cas d'un contreventement en croix de Saint-André, on peut utiliser des éléments plus fins travaillant en traction (câbles par exemple).

Par extension, lorsqu'une façade de bâtiment est soumise à un effort perpendiculaire de vent, elle n'offre en général pas de rigidité hors de son propre plan. C'est donc par le biais de structures secondaires, horizontales ou verticales, souvent en treillis que l'on appelle poutres au vent, que l'on retransmet cet effort aux plans rigides de contreventement.

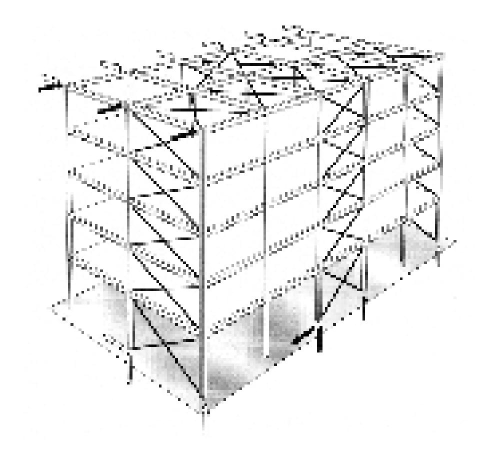
La rigidification d'un ou plusieurs nœuds

Cette option est utilisée pour les contreventements verticaux. On parle alors d'un portique, assemblage rigide de deux poteaux et d'une poutre (voir chapitre 4).
Un exemple de rigidification consiste à mettre en place sur des étages superposés des « portiques multiples ». L'utilisation de goussets ou de demi-triangulations permet de rigidifier les assemblages.

Une structure spatiale intéressante à nœuds rigides est le tabouret, élément auto-stable d'ossature constitué de quatre poteaux et de quatre poutres sur un étage. Des tabourets peuvent être superposés sur plusieurs étages.

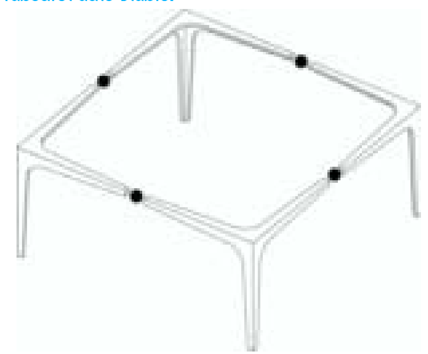


Système de stabilité. Les treillis sont constitués de barres qui forment des triangles. Les axes des barres concourantes au même nœud doivent se couper en un seul point. Cf. Bibliographie [10, p.228].

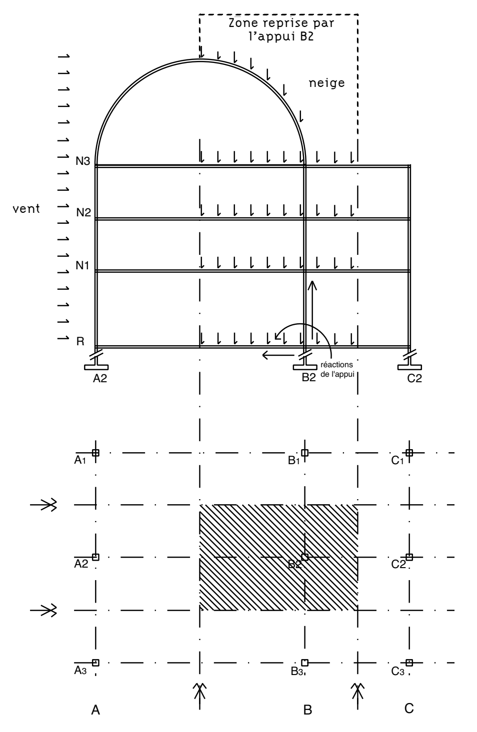


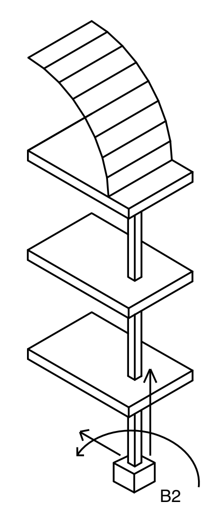
Stabilité par des palées de contreventements verticales et horizontales. Cf. Bibliographie [12, p.117].

Tabouret auto-stable.



La descente de charges





La descente de charges

On rappelle que les actions sont les forces et couples liés aux charges exercées sur la construction. Les réactions sont les efforts qui apparaissent au niveau des appuis pour assurer l'équilibre et les sollicitations sont les efforts internes qui sollicitent la structure.

Une descente de charges consiste à évaluer toutes les forces qui transitent dans la structure porteuse du bâtiment, jusqu'au niveau des appuis et des fondations. À ce niveau, les appuis ont des degrés de liberté qui sont bloqués et qui génèrent donc des réactions. Les équations de l'équilibre des forces et des moments permettent de déterminer les réactions lorsque la structure est isostatique.

Exemple :

La structure verticale B2 prend les charges des planchers et de la couverture suivant la surface délimitée autour de B2 (en hachuré sur le dessin). Ces charges comprennent le poids propre des structures primaires et secondaires dans ce quadrilatère, les charges d'exploitation, le poids de la neige, les efforts au vent transmis horizontalement et verticalement. Les autres structures verticales A, B1, B3 et C se répartiront le reste des charges, auquel s'ajoutera le poids de la façade. L'appui étant encastré, il reprend les charges horizontales du vent compte tenu du bras de levier entre la résultante de ces efforts et l'appui. On notera qu'il apparaît un moment fléchissant au droit de l'appui. Les réactions aux appuis ou encore les efforts cumulés au niveau de l'assise du bâtiment permettront de déterminer les dimensions des fondations.

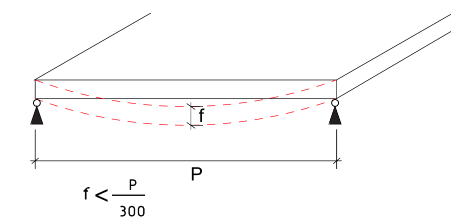
La note de calcul

Les règles et normes de conception et de calcul en France appliquées actuellement à l'étude des projets de construction en acier sont les règles CM66 et leur additif de 1980. La nouvelle réglementation européenne des Eurocodes est aujourd'hui également applicable, complétée par les Documents d'application nationale (DAN) qui en précisent les paramètres.
Une fois que les différentes actions susceptibles de s'appliquer sont déterminées, la réglementation prévoit un certain nombre de combinaisons d'actions. En outre, les actions sont multipliées par des coefficients de pondération. Ceux-ci sont en général supérieurs ou égaux à 1. Des coefficients sont également appliqués aux valeurs de résistance des matériaux. Par ce moyen sont pris en compte :
– la possibilité que les actions aient des valeurs plus défavorables que les valeurs caractéristiques calculées ;
– les imperfections dans la réalisation des structures ;
– les incertitudes sur la résistance des matériaux…

Les Eurocodes font l'objet de plusieurs chapitres :
- l'Eurocode 1 définit les bases de calcul et les actions sur les structures ;
- l'Eurocode 2 fournit les règles de vérification des structures en béton ;
- l'Eurocode 3 fournit les règles de vérification des structures en acier ;
- l'Eurocode 4 fournit les règles de vérification des structures mixtes acier-béton ;
- les Eurocodes 5 à 9 fournissent respectivement les règles pour les constructions en bois, en maçonnerie, les fondations, les constructions parasismiques et les constructions en alliage d'aluminium.

État limite ultime (ELU)

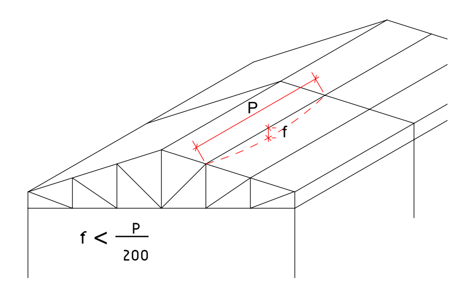
Cet ensemble de combinaisons est destiné à assurer la sécurité de la construction. L'état limite ultime est atteint dans les cas suivants :
– perte d'équilibre de la structure ;
– formation pour tout ou partie de la structure d'un mécanisme de ruine ;
– instabilité de forme ;
– rupture d'un élément ;
– déformation plastiques excessives.
Pour cet état limite on procède à une vérification relative aux contraintes : la stabilité d'ensemble doit être vérifiée sous l'effet des combinaisons les plus défavorables des actions pondérées ; dans chaque élément, les contraintes maximales pondérées doivent être inférieures à celles qui provoquent la ruine de l'élément.



Flèche d'un plancher
S'agissant des planchers courants pour les logements ou bureaux, la flèche due à la totalité des charges (voire uniquement des surcharges d'exploitation s'il y a contre-flèche) ne devra pas dépasser les 1/300e.

État limite de service (ELS)

L'état limite de service est atteint lorsqu'une structure devient inapte aux fonctions normales pour lesquelles elle est conçue, en particulier lorsque des déformations excessives apparaissent. On procède donc à des vérifications relatives aux déformations où, sauf cas exceptionnel, les actions ne sont pas pondérées.
Les déformations de flexion sont en général déterminantes pour le dimensionnement de la structure. Ces critères imposent un surdimensionnement des structures par rapport à ce qui serait nécessaire pour simplement reprendre les charges.



Flèche d'une panne de couverture
Pour les éléments de couverture, la flèche due aux charges permanentes et aux autres charges ne doit pas être supérieure au 1/200e de la portée (soit 20 mm pour une panne de couverture d'une portée de 4 m).

4 LES ÉLÉMENTS DE LA STRUCTURE

Le travail de conception et les choix techniques résultent de la combinaison des notions évoquées dans le chapitre précédent et de la connaissance des archétypes structurels présentés ci-après. La richesse potentielle des solutions structurelles explique leur rôle stimulant dans la conception architecturale et la ressource d'innovation et de développement qu'elles peuvent représenter. La recherche du choix structurel doit constituer un des supports de l'imagination et de la créativité architecturale.

Les poteaux



Poteau caisson arborescent du gymnase de Saint-Jean-de-Maurienne. Richard Plottier architecte.

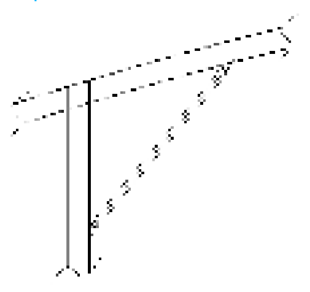
On parle de poteaux pour les éléments verticaux. Le terme de bielle concerne des éléments en biais qui reprennent aussi des efforts horizontaux. Les extrémités des bielles sont toujours articulées. On utilise également les termes de jambe de force, de buton ou de bracon. Les termes de fût et de pile concernent quant à eux des éléments encastrés en base, libres en tête.

Les poteaux doivent reprendre des efforts de compression, de flexion due au vent et résister au flambement. Leur section doit présenter une bonne rigidité à la compression dans toutes les directions et en particulier suivant leurs axes principaux. Les poteaux constituant les montants de portique sont également sollicités en flexion.



Les critères suivants conduiront à déterminer le type de poteau retenu :
– les choix architecturaux ;
– les encombrements et les choix techniques ;
– les coûts de l'acier (les profils creux sont plus onéreux que les profilés) ;
– les coûts de mise en œuvre : complexité des attaches et des liaisons ;
– les facilités et simplicités d'assemblage des composants de second œuvre : cloisons, plafonds, façades ;
– les conditions d'entretien : surfaces à peindre ou à protéger de la corrosion ou du feu.

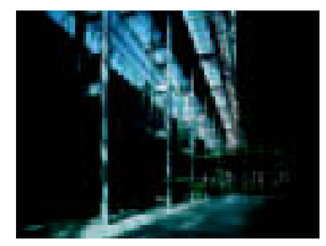
Croquis d'une bielle.



Les type de poteaux et de bielles possibles sont :
– les profilés en I ou en H ;
– les tubes de section circulaire, carrée, elliptique ou demi-elliptique ;
– les poteaux reconstitués par laminés assemblés ;
– les caissons ;
– les poteaux treillis.
D'autres solutions sont possibles en combinant des profils divers pour réaliser des sections variables composées par association de tubes et de profilés.

Les points porteurs

La question de l'optimisation du nombre de points porteurs se pose toujours au moment de la conception et de la prise en compte du programme. Au regard de l'aménagement des espaces, les poteaux sont toujours jugés comme des obstacles qu'il convient de limiter le plus possible. Les trames classiques sont de l'ordre de 4,5 à 6 m pour des logements. Construire avec de grandes portées (par exemple 12 à 18 m pour des bureaux ou 15 à 16 m pour des parkings) est intéressant pour dégager de grands plateaux libres. Il faut alors prendre en compte la hauteur plus importante des poutres et l'éventuel surcoût engendré par leur fabrication, leur transport et leur assemblage. L'utilisation de poutres alvéolaires permettant le passage des gaines et des fluides offre cependant une solution alternative intéressante.

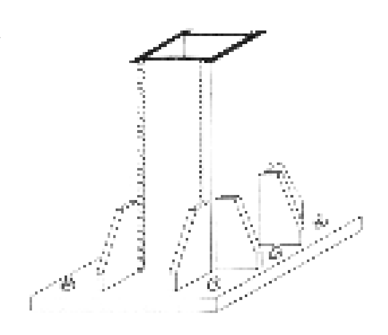


Une file de poteaux de structure. Palais de justice de Grenoble, France. Claude Vasconi architecte.

À noter que le nombre de points porteurs dépend également du type de fondations à prévoir en fonction de la nature des sols rencontrés. Quand un sol est mauvais, il convient de limiter les points de fondation et par conséquent de réduire le nombre de poteaux, sauf pour le cas des fondations par radier général. Les portées des poutres seront alors plus importantes. À noter qu'une ossature en acier permet de limiter le poids du bâtiment et donc de réduire l'importance des fondations.

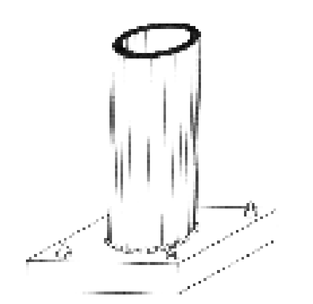
L'assise du poteau sur les massifs de fondation

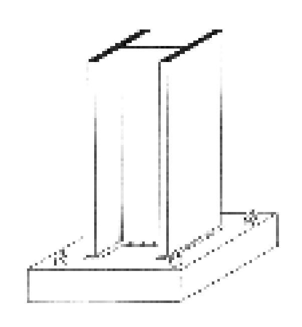
La charge de compression peut être transmise au béton de fondation par une simple platine soudée à l'extrémité inférieure du poteau pour bien répartir les pressions sur le béton. Les renforcements latéraux (goussets) permettent de mieux répartir la contrainte. Les formes de la platine et du socle en béton doivent être soigneusement étudiées pour éviter des rétentions d'eau qui provoquent la corrosion des aciers : percements d'écoulement, pente... Ce soin technique participe au fini architectural et à la qualité de ses détails. Des ancrages dans le béton sont nécessaires pour maintenir le poteau en position et résister aux éventuels efforts d'arrachement.

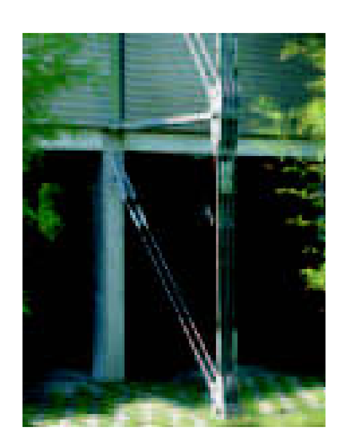


Assises de différents types de poteaux
Suivant l'épaisseur de la plaque d'assise en acier, des raidisseurs sont nécessaires (fig. ci-dessus) ou pas (fig. ci-dessous).

En général, l'entreprise de gros-œuvre implante des réservations, l'entreprise de construction métallique met en place avec une précision de l'ordre du millimètre le système d'ancrage et le béton est coulé ensuite. Ce n'est qu'après contrôle que le poteau et sa platine sont positionnés.







Un jeu de tirants obliques et de bielles assure le contreventement transversal rejeté à l'extérieur. Immeuble d'habitation à Constance, Allemagne. Ingo Bucher-Beholz architecte.

Les suspentes et les tirants

Comme un poteau, une suspente transmet une charge suivant son axe longitudinal. Cependant, à l'inverse du poteau qui travaille à la compression, une suspente transmet une charge en travaillant uniquement en traction simple. Les tirants, haubans et câbles reprennent des efforts de traction ayant une composante verticale et une composante horizontale. Ils peuvent présenter une section quelconque, n'étant pas sujets au flambement. On utilise de préférence les sections dont l'attache en extrémité est la plus facile :

– ronds pleins, pouvant être filetés pour l'assemblage par écrous ;
– plats ou cornières percées, assemblés par boulons ;
– câbles ;
– profils creux comportant une platine d'attache soudée en bout.

Une suspente peut être préférée à un poteau pour des raisons fonctionnelles, d'encombrement ou architecturales, par exemple pour tenir une poutre et franchir un espace sans point d'appui.

Poutres sous-tendues.

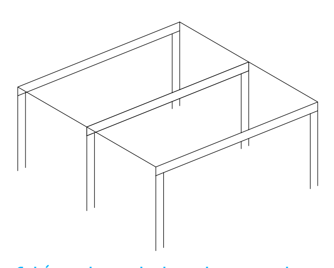


Schéma de poutraison. Les sommiers (poutres principales) portent ici sur 12 m, les solives sur 5,50 m. Une règle de prédimensionnement pratique consiste à prendre une hauteur minimale de poutre de 1/25 de la portée pour les sommiers et de 1/30 pour les solives.

Exemple : pour un sommier de 12 m,
h= 12000 mm/25= 480 mm,
soit un HEA 500.
Pour une solive de 5,50 m,
h= 5500 mm/30= 180 mm,
soit un IPE 180.

Les poutres

Les poutres sont des éléments la plupart du temps horizontaux qui doivent reprendre essentiellement des efforts de flexion. Leur section doit par conséquent présenter une inertie adaptée dans le sens de la flexion et donc une certaine hauteur. La flexion comporte une composante de traction et une composante de compression que l'on retrouve aux extrémités de chaque section. Ces efforts transmis dans les membrures hautes et basses sont d'autant plus faibles que la hauteur de la poutre est plus importante. Schématiquement, doubler la hauteur de la poutre divise par quatre les efforts auxquels elle est soumise. La section des membrures est par conséquent capitale pour calculer le poids de l'acier à utiliser. Cette caractéristique très importante pour les poutres en treillis usuelles se retrouve dans les structures spatiales.

On parle non seulement de poutre, mais aussi de panne, de chevron, de traverse, de linteau, de limon, de raidisseur, de poutre au vent, de console, de porte-à-faux, de cantilever,…

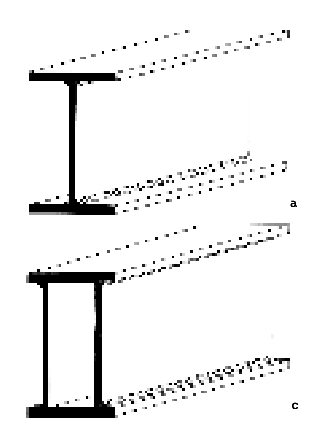
La poutrelle

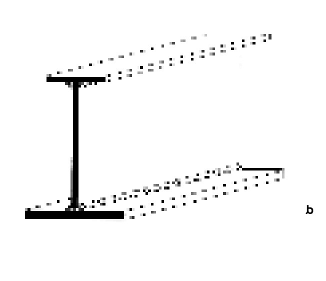
Les poutrelles en acier sont diversement utilisées dans le bâtiment. Dans les cas courants de charges et pour des portées moyennes de l'ordre d'une dizaine de mètres environ, les profilés courants en I et en H constituent des poutres bien adaptées. Il est par ailleurs facile de liaisonner l'ossature secondaire des planchers, des façades et des couvertures sur les ailes des profilés en I ou en H. La poutre qui travaille essentiellement en flexion verticale a pour fonction

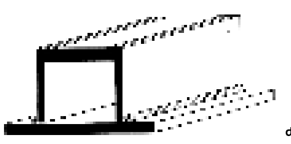
principale de constituer la structure des planchers et des couvertures et de leur faire franchir des espaces et des vides.

La poutre reconstituée soudée (PRS)

À partir de tôles, de larges plats ou de plaques, on peut obtenir des poutres symétriques ou dissymétriques, de hauteur et de largeurs d'ailes constantes ou variables en soudant les pièces, à savoir les ailes et l'âme, les unes aux autres. Ainsi on conçoit de façon optimale une poutre en fonction des efforts qu'elle est censée reprendre. Ce type de poutre est particulièrement intéressante quand la portée augmente car la hauteur de poutre nécessaire devient alors plus importante.
On peut aussi obtenir des poutres caisson de section carrée, rectangulaire ou trapézoïdale avec deux âmes soudées dont la rigidité est encore plus grande et peut être encore renforcée par des raidisseurs intérieurs. Ce type de poutre est souvent utilisé dans les ponts.





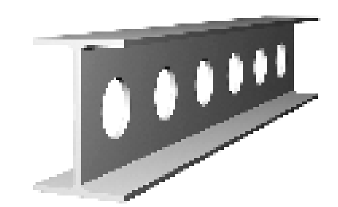


Poutres reconstituées par soudage
a. Poutre soudée à âme pleine : les poutres d'une hauteur supérieure à 1 m sont reconstituées par soudage, les membrures étant en larges-plats et les âmes en tôle.
b. Profil asymétrique reconstitué par soudage.
c. Poutre en caisson soudé : profil soudé à âme double pour la reprise de charges très fortes.
d. Profil soudé en « chapeau » utilisé comme poutre de plancher, la membrure inférieure en saillie servant à l'appui de la dalle.

L'intérêt des PRS est de pouvoir affiner l'épaisseur de l'âme et des semelles et donc de gagner du poids en optimisant la section par rapport aux efforts qui y transitent, de constituer plus facilement des profilés cintrés et d'associer le cas échéant des nuances d'acier différentes dans la même poutre. Les efforts de flexion et donc les besoins en section ne sont généralement pas constants le long d'une poutre. Pour une optimisation de la matière, on peut réaliser des PRS dites à inertie variable.
Ces poutres sont couramment utilisées notamment pour des profils dont la hauteur est supérieure à 400 mm. La plupart des entreprises de construction métallique sont équipées de bancs de soudure qui permettent de les fabriquer automatiquement.

La poutrelle alvéolaire ou ajourée

Les poutrelles ajourées, appelées aussi poutrelles alvéolaires, sont obtenues à partir de laminés courants découpés en demi-poutrelles dont l'âme est elle-même découpée en cercle ou hexagones ; elles sont ensuite reconstituées par soudage. Ceci permet d'alléger le poids et surtout de faciliter le passage des gaines et des fluides dans la hauteur de la poutre. Elles sont donc particulièrement intéressantes pour les immeubles de bureaux en permettant des portées de 20 m en solution mixte acier-béton.

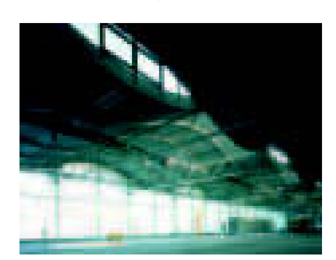


Poutre alvéolaire.

Passage de gaines et de réseaux à travers une poutre alvéolaire.



Les poutres en treillis et les fermes



Poutres en treillis type Warren de la structure des ateliers de maintenance des tramways à Bordeaux. Jacques Ferrier architecte.

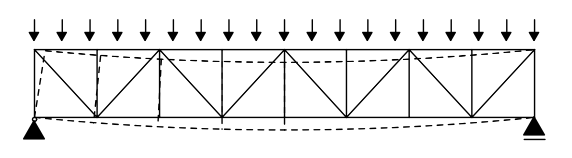


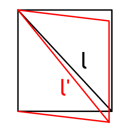
Poutres en treillis, structure de la couverture du stade de France. MZ/RC architectes.

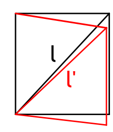
On appelle indifféremment treillis, triangulation ou structure réticulée, un ensemble de barres assemblées les unes aux autres à leurs extrémités, de manière à former une structure portante stable, plane ou spatiale. Elle est constituée par l'assemblage de plats, de cornières, de profils I ou T et de profils creux. Légères, les poutres en treillis (ou poutres triangulées) permettent de franchir de plus grandes portées mais nécessitent des assemblages parfois complexes.
Les principaux types de poutres treillis sont décrits ci-dessous.

Les poutres à membrures parallèles

Il en existe plusieurs sortes et notamment :
– les poutres à treillis en N. C'est une des solutions les plus anciennes. En charge, les montants sont comprimés et les diagonales sont soit tendues, soit comprimées ;
– les poutres à treillis en V, dites poutres Warren. C'est une des formes les plus courantes ;
– les poutres à treillis en croix de Saint-André.







Ci-contre, schéma d'une poutre en treillis en flexion.
La déformation des panneaux provoque un allongement (traction) ou un racourcissement (compression) des diagonales suivant leur position.

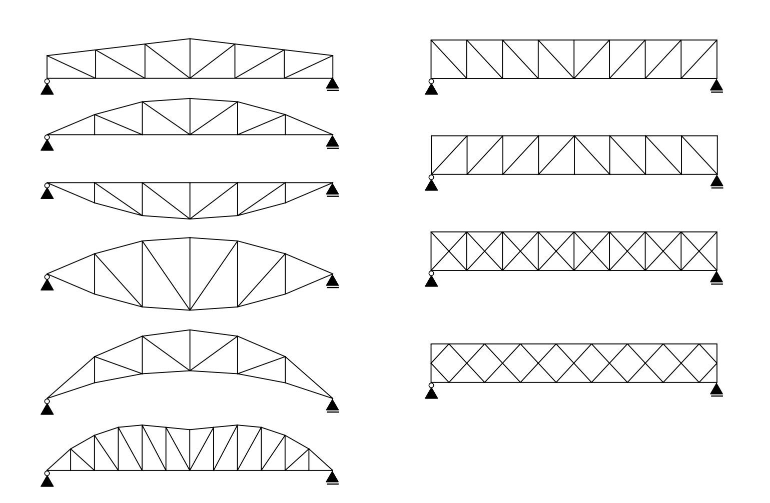
Les poutres à membrures non parallèles

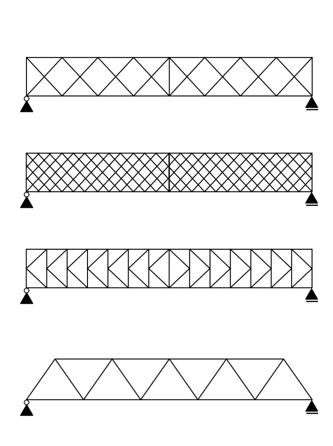
Ces poutres permettent, à l'instar des PRS à inertie variable, de répondre de manière optimale aux efforts auxquels elles sont soumises. Il est même possible que les membrures ne soient pas de même profil, l'une étant en compression, l'autre étant en traction. Le profil comprimé contient en effet le maximum de matière, le câble ou tirant (tendu), le minimum. Cette différence de matière est liée à la prise en compte du phénomène de flambement dans la partie comprimée.

Il existe de nombreux types de poutres de ce genre.

Viaduc de l'Arc à poutres sous-tendues en « arête de poisson ». Bruno Gaudin architecte.







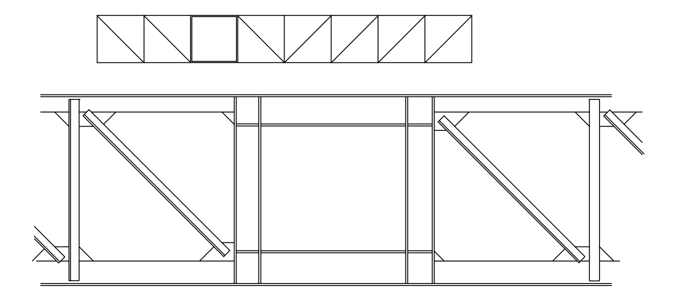
Poutres en treillis avec membrures non parallèles ou cintrées (colonne de gauche) et poutres treillis à membrures parallèles.

Une règle pratique de prédimensionnement d'une ferme en treillis consiste à prendre une hauteur de poutre de 1/12e de la portée pour une poutre de hauteur constante et de 1/5e de la portée pour une ferme de charpente de forme triangulaire.
Cf. Bibliographie [10, p.200].

Les poutres échelles ou poutres Vierendeel

Les assemblages des montants de ce type de poutre sont rigides, sans diagonales. L'ensemble forme un système hyperstatique très rigide. Ce système est plus lourd et moins performant en flexion mais permet de libérer l'espace central de la poutre pour laisser passer des circulations, des gaines… Il est possible de jumeler une poutre treillis classique avec une poutre Vierendeel. La suppression de la diagonale conduit à renforcer le cadre autour du panneau. Ce type de solution permet aussi de réaliser des poutres de façade dites « poutres américaines » dont la hauteur est égale à celle d'un étage de la construction.

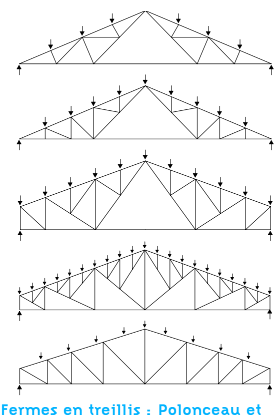




Ci-contre, cadre rigide de type Vierendeel inséré dans une poutre en treillis.

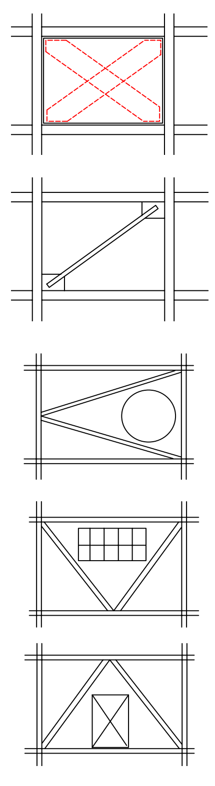
Les fermes

Les fermes sont des poutres en treillis dont les membrures supérieures suivent la pente de la toiture. L'entrait des fermes est souvent retroussé pour mieux dégager le gabarit ou l'espace libre sous la charpente. Parmi les modèles les plus courants au XIXe siècle, les fermes Polonceau (inventées en 1837) ont leurs arbalétriers sous-tendus par des bielles et des câbles.



Fermes en treillis : Polonceau et variantes, et triangulées (en bas).

Les cadres articulés et les portiques



Types de contreventements de cadres :
– par un matériau rigide, voile de béton armé ou maçonnerie (en haut). Les angles doivent être bloqués pour assurer la transmission des efforts en compression ;
– par une barre en diagonale (au milieu). Une barre inversée peut être ajoutée pour éviter la reprise d'efforts en compression ;
– par des barres obliques libérant des zones de passages ou d'éclairement (en bas).

Les cadres articulés

Un cadre articulé n'est pas stable en lui-même. Divers procédés permettent de le rendre indéformable.

Le remplissage du panneau par un élément rigide dans son plan

Le panneau est rendu indéformable s'il est rempli de matériaux rigides : béton armé, maçonnerie. Dans ce cas de figure, le matériau rigide doit « bloquer » les angles de la charpente. On utilise de façon classique ce mode de contreventement au niveau des gaines de circulation verticales : escaliers, cages d'ascenseur. Le contreventement bénéficie alors de quatre panneaux rigides aux quatre faces du noyau en béton armé. Toutefois, la solution de rigidification par contreventement constitué de parois lourdes pénalise la charpente par un surdimensionnement (poids).

Il est important de noter que si les remplissages en maçonnerie ou en béton armé ne sont pas prévus pour participer au contreventement, ils doivent être désolidarisés de l'ossature métallique, sinon les parties pleines sont exposées à des risques de fissuration.

La triangulation intérieure du panneau par des barres

Une barre en écharpe (diagonale) dans le panneau assure sa triangulation donc son indéformabilité. Des zones de passage ou d'éclairement peuvent ainsi être ménagées.

Les contreventements métalliques offrent l'avantage d'être installés dès le montage de l'ossature, évitant en partie les contreventements provisoires en attente des remplissages.

Les portiques

Les portiques qui permettent d'assembler de manière continue les poutres ou les arbalétriers et les poteaux, sont l'un des éléments caractéristiques de la construction métallique. Les portiques peuvent être constitués de I et de H, de tubes, de PRS à section variable ou non, de caissons, d'éléments en treillis.

Tous les éléments de ces types de structure participent à la résistance aux efforts verticaux aussi bien qu'horizontaux. Ils exercent donc des efforts horizontaux sur leurs appuis. Par ailleurs, la plus grande inertie des éléments poutre et poteaux des portiques est nécessairement dans le plan du portique, de manière à assurer la plus grande résistance en flexion dans ce plan.
Ils peuvent avoir deux ou trois articulations, ou être complètement rigides. Lorsque plusieurs panneaux sont rigidifiés dans une même file ou sur plusieurs étages superposés, on obtient des « portiques multiples ».

On distingue quatre types de portiques à rez-de-chaussée suivant que les liaisons sont articulées ou rigides. Notons que les assemblages réels sont la plupart du temps semi-rigides.

Le portique à trois articulations

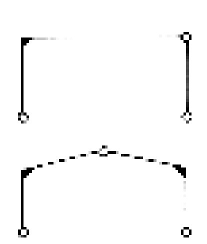
Ce portique est isostatique. Il présente la caractéristique d'avoir un moment nul à la clef quel que soit le cas de charge. La dimension est réduite à cet endroit et permet ainsi d'optimiser la hauteur libre. En outre, les tassements différentiels et les variations thermiques peuvent être absorbés par cette structure. En revanche, sous l'effet de charges horizontales, la déformation de ce portique est plus importante que pour les modèles suivants.
Ce type de portique se retrouve fréquemment dans les halles et les toitures à versants inclinés, moins dans les bâtiments à étages.

Le portique à pieds de poteaux articulés

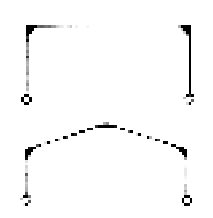
Ce portique articulé à la base des poteaux est hyperstatique. C'est la rigidification des assemblages poteaux-poutres qui assure la stabilité des panneaux (cadres). Il utilise moins de matière que le portique à trois articulations. Avec une traverse brisée ou en biais, il est utilisé dans les halles ; avec une traverse droite, on le retrouve dans les bâtiments à étages.

Le portique à pieds de poteaux encastrés

Du fait des encastrements en pied, les sections peuvent être moins importantes que dans les cas précédents pour résister aux moments de flexion.



portiques à trois articulations



portiques à pieds de poteaux articulés

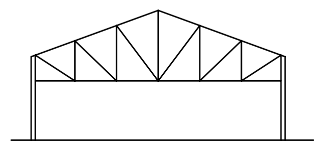


portique à pieds de poteaux encastrés

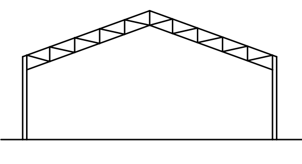
Différents types de portiques.

Exemple de portique à deux articulations dans un bâtiment agricole.
Noter le contreventement longitudinal dans le plan de la toiture. Une règle pratique de prédimensionnement consiste à prendre une hauteur minimale d'arbalétrier de 1/30 de la portée.



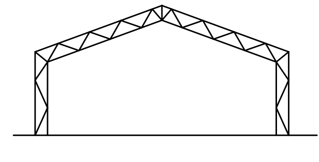


La limitation des déplacements sous l'action des forces horizontales conduit à l'augmentation des sections des poutres et des poteaux.

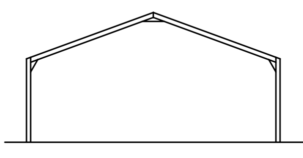


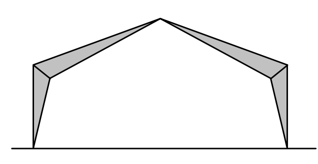
Le portique totalement encastré

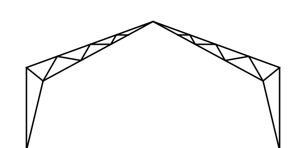
Ces portiques ont un degré d'hyperstaticité supérieur. Ils sont utilisés lorsque des charges très importantes sont mises en œuvre et lorsque la portée doit être très grande. En revanche, cette structure absorbe peu les tassements différentiels et les variations thermiques. C'est une forme courante dans les bâtiments à étages. Cependant les « nœuds » (assemblages) peuvent être gênants, au niveau des planchers par exemple, à cause des goussets ou des équerres nécessaires à l'assemblage. Les bases des portiques peuvent être fixées sur des infrastructures en béton armé ou des fondations, ou sur des poteaux et des poutres de l'étage inférieur.



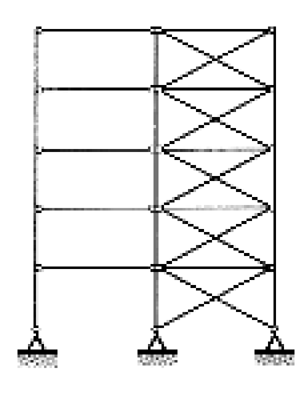
Ce sont des structures relativement coûteuses (environ 15 à 20 % de plus que des structures avec des contreventements), mais elles présentent l'avantage d'un moindre encombrement de l'espace et d'un usage plus flexible dans le temps en cas de changement d'affectation des locaux ou des immeubles.

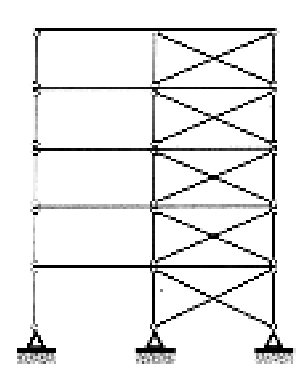






Différentes formes de portiques composés de poteaux et de poutres de toiture.

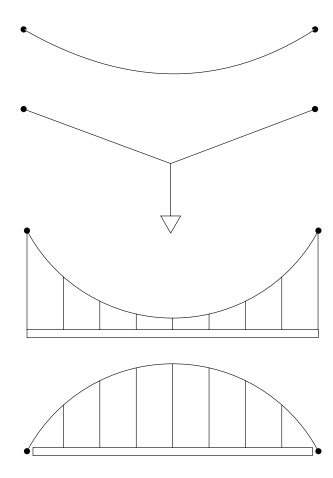




Ci-contre, principes de cadres articulés et contreventés pour des bâtiments multi-étages :
– à poteaux continus (à gauche) Leur hauteur est en pratique limitée à deux niveaux maximum pour des raisons de transport ;
– à poutres continues (à droite). La longueur des poutres est limitée en pratique à 18 m.
Cf. Bibliographie [12, p.105 b et c].

Les arcs et les catènes

En termes de schéma statique, l'arc est l'inverse de la catène : si le sens des efforts appliqués est contraire, on passe de la traction pure à la compression pure. On utilise l'arc en acier pour les ouvrages d'art et pour les grandes halles. Les produits utilisés sont généralement les caissons et les structures tridimensionnelles réticulées. Les catènes sont essentiellement utilisées pour les ouvrages d'art. On utilise généralement des câbles. Étant donné les conditions d'appuis (articulation ou encastrement pour les arcs, articulations pour les catènes) et les formes géométriques, ces deux types d'élément de structure travaillent principalement en compression ou en traction.



Ci-contre, schéma statique d'une catène et d'un arc
– en observant un fil tenu à ses deux extrémités, on note que le fil est soumis à une traction pure sous l'effet de son poids propre. Il prend une forme dite de chaînette ;
– en suspendant ensuite un poids beaucoup plus important que celui du fil, toujours en traction pure, on obtient une forme brisée en deux segments ;
– par extension, il existe pour un chargement donné une forme géométrique dite funiculaire qui met la catène en traction pure. Lorsque le poids est uniformément réparti à l'horizontale, le funiculaire est une parabole. Le schéma inversé donne un arc en compression pure.

À noter que les efforts aux appuis ont des composantes verticale et horizontale, et que cette dernière est d'autant plus importante que le rapport flèche/corde est faible. Des fondations importantes sont donc très souvent nécessaires pour reprendre ces efforts verticaux et horizontaux. Dans le cas particulier de l'arc, plus la courbure est faible (ou le rayon grand), plus l'arc est comprimé et plus il y a risque de flambement. Une solution pour éviter des fondations trop importantes consiste à équilibrer ces efforts horizontaux par un tirant.

Il existe trois types d'arcs principaux.

L'arc à trois articulations

Cette structure est isostatique, il n'y a pas de moment à la clé. Les tassements différentiels et les dilatations sont bien repris par les articulations. Les moments sont en revanche assez conséquents dans une section courante.

L'arc à deux articulations

Les appuis sont articulés, la structure est hyperstatique. Les moments sont plus faibles dans ce type d'arc et la section est donc plus réduite. En revanche, les tassements différentiels peuvent générer des contraintes supplémentaires.

L'arc encastré

Les appuis sont encastrés, la structure est hyperstatique. Des moments sont transmis aux appuis ce qui génère des fondations plus importantes.



Arc à trois articulations. Charpente de la Halle Tony-Garnier à Lyon. Tony Garnier et Bertrand de Fontviolant architectes ; Atelier de la Rize architectes pour la rénovation.

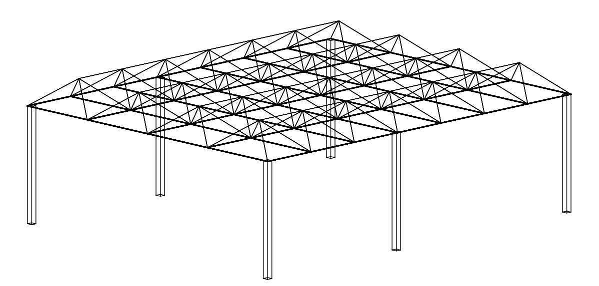


Arc à deux articulations. Viaduc de Garabit. Gustave Eiffel constructeur.

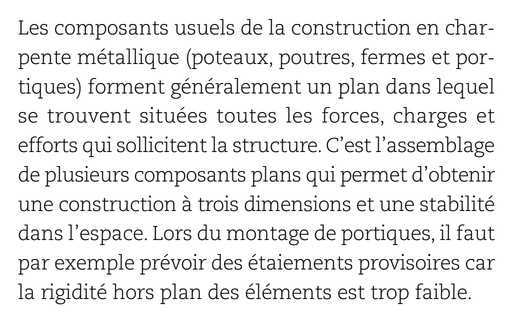
Arc encastré. Passerelle Solférino. Marc Mimram architecte.



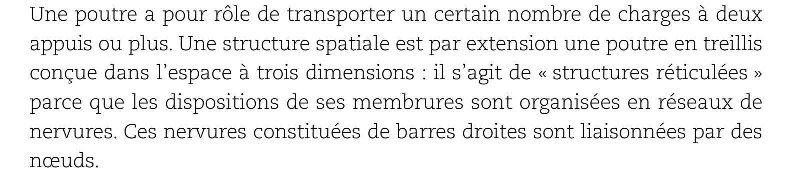
Les structures spatiales



Exemple de nappe tridimensionnelle autostable.



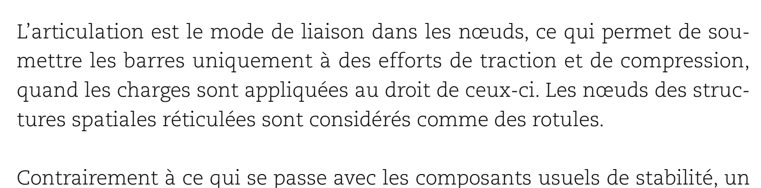
Les composants usuels de la construction en charpente métallique (poteaux, poutres, fermes et portiques) forment généralement un plan dans lequel se trouvent situées toutes les forces, charges et efforts qui sollicitent la structure. C'est l'assemblage de plusieurs composants plans qui permet d'obtenir une construction à trois dimensions et une stabilité dans l'espace. Lors du montage de portiques, il faut par exemple prévoir des étaiements provisoires car la rigidité hors plan des éléments est trop faible.



Une poutre a pour rôle de transporter un certain nombre de charges à deux appuis ou plus. Une structure spatiale est par extension une poutre en treillis conçue dans l'espace à trois dimensions : il s'agit de « structures réticulées » parce que les dispositions de ses membrures sont organisées en réseaux de nervures. Ces nervures constituées de barres droites sont liaisonnées par des nœuds.



Nœud soudé dans une ossature tubulaire.



L'articulation est le mode de liaison dans les nœuds, ce qui permet de soumettre les barres uniquement à des efforts de traction et de compression, quand les charges sont appliquées au droit de ceux-ci. Les nœuds des structures spatiales réticulées sont considérés comme des rotules.



Nœud d'articulation en acier moulé. Structure de l'une des sphères d'Eden Project à Bodelva-Cornouailles en Angleterre. Nicholas Grimshaw and Partners architectes.

Contrairement à ce qui se passe avec les composants usuels de stabilité, un ensemble spatial ou tridimensionnel se suffit à lui-même. La rigidité est assurée par la structure elle-même pour toutes les sollicitations dans toutes les directions de l'espace.

Ces structures présentent les avantages suivants :
– montage : possibilité de préassemblage au sol et de levage d'ensembles ;
– économie de matière ;
– légèreté ;
– transparence ;
– esthétique ;
– flexibilité.
Il peut y avoir en revanche des difficultés éventuelles de transport ainsi qu'un coût élevé des assemblages.

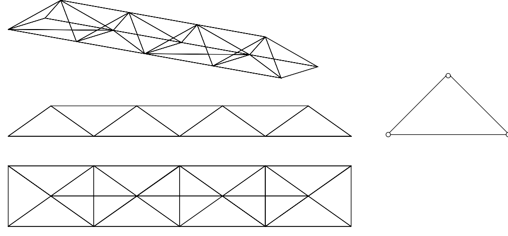
Charpente en treillis tridimensionnel de la couverture du vélodrome de Berlin. Dominique Perrault achitecte.

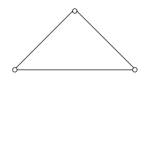


On retiendra les trois typologies de structures spatiales suivantes :
– les poutres triangulaires ;
– les doubles nappes ;
– les voûtes et les coques.

Les poutres triangulaires

La poutre triangulaire comporte trois membrures parallèles et trois plans de treillis. Cette poutre ne nécessite aucun élément complémentaire pour être stable. C'est une structure spatiale.







Principe d'assemblage d'une poutre triangulaire en tubes.



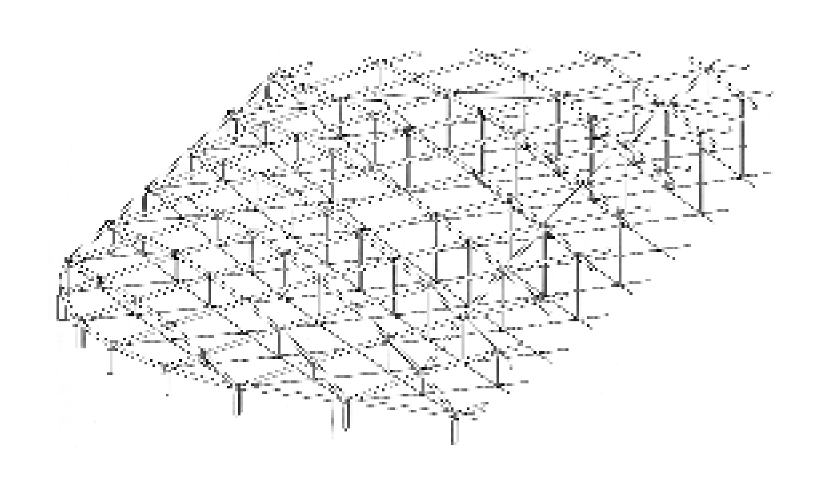
Poutre triangulaire.

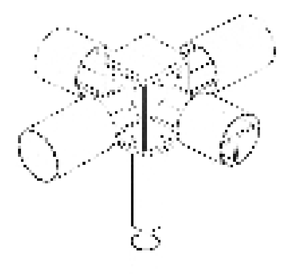
Les doubles nappes

On distingue les nappes bidimensionnelles des nappes tridimensionnelles.

Les doubles nappes à poutres croisées ou bidimensionnelles

La rigidité est assurée par deux familles perpendiculaires de poutres. C'est l'image du caillebotis. Les grilles supérieures et inférieures sont identiques et superposées suivant les trames orthogonales carrées, rectangulaires ou triangulaires.







Axonométrie de la double nappe de la toiture de la patinoire de Grenoble et détail d'un nœud d'assemblage montrant le poinçon comprimé entre la nappe supérieure en tubes ronds et les tirants en partie basse.
I. Hérault et Y. Arnod architectes.

Nœud d'assemblage de la structure de la coupole du musée maritime d'Osaka au Japon. Paul Andreu avec François Tamisier et Masakasu Bokura architectes.

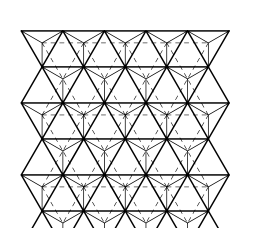
Les doubles nappes tridimensionnelles

Une double nappe tridimensionnelle comporte aussi deux plans de membrures dont les croisements sont reliés par des treillis, mais les nœuds supérieurs ne sont plus à la verticale des nœuds inférieurs comme dans la double nappe bidimensionnelle. Les liaisons par éléments inclinés (non verticaux) augmentent la rigidité de l'ensemble.

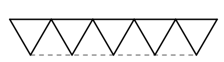
Il existe de nombreuses grilles de ce type. La plus simple consiste en la superposition de deux grilles orthogonales identiques. Une fois chargée, la nappe supérieure est entièrement comprimée, alors que la nappe inférieure travaille en traction. En raison de leur grande rigidité, ces grilles ont une flèche faible. Quand elles sont simples, elles peuvent être réalisées avec des cornières ou avec des tubes. Les géométries plus complexes nécessitent l'utilisation exclusive de tubes. Des nappes encore plus résistantes peuvent être obtenues en créant deux nappes triangulaires liaisonnées entre elles par trois réseaux de plans verticaux.

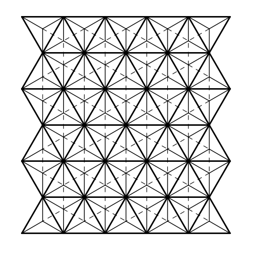
L'épaisseur des doubles nappes des structures spatiales réticulées pouvant être importante, il est naturel de penser à occuper les volumes libres entre les barres en les rendant utilisables. Ainsi, les doubles nappes de hauteur d'étage permettent de franchir économiquement de grandes portées tout en utilisant les espaces entre les structures. Des mégastructures réticulées peuvent être conçues sur plusieurs étages.

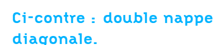
Doubles nappes à mailles triangulaires.

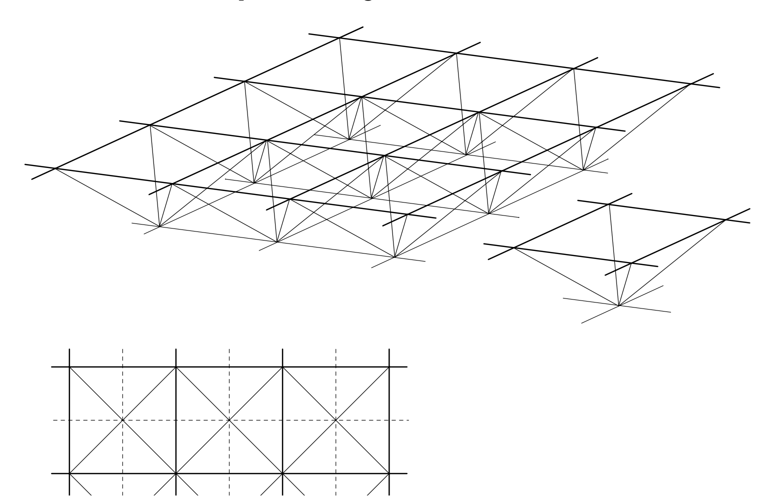












Ci-contre : double nappe diagonale.

Les voûtes et dômes

Le principe de l'arc peut être utilisé pour des nappes cintrées dans une direction formant une voûte.

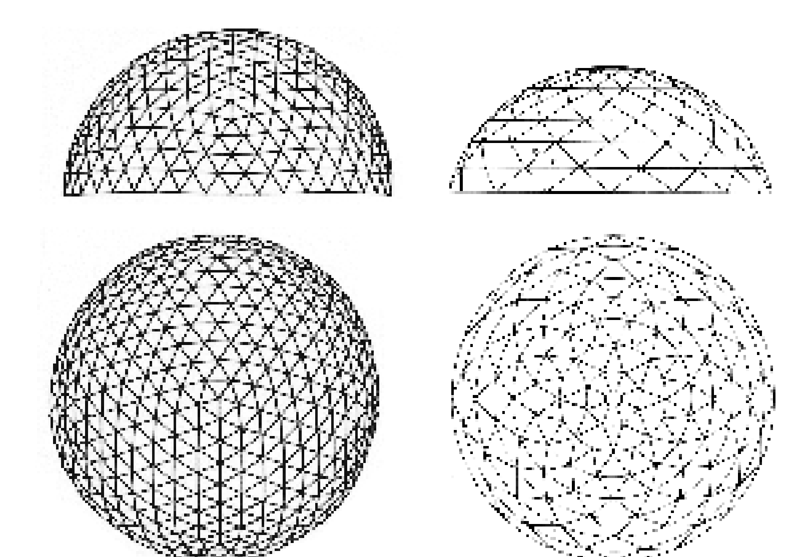
En faisant pivoter un arc autour de l'axe vertical passant par sa clé, on obtient la figure du dôme géodésique, dont Buckminster Fuller a été l'inventeur et le promoteur. Le plus connu de ses dômes est celui du pavillon des États-Unis à l'Exposition Universelle de Montréal (diamètre : 76 m). Ces structures peuvent couvrir des surfaces importantes avec un poids très réduit.

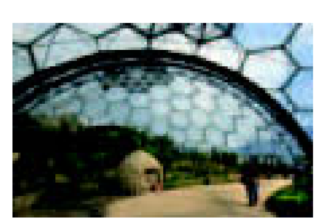
Lorsque les courbures sont faibles, ou pour une grande portée, on double la nappe d'une deuxième surface dont les nœuds sont reliés à ceux de la première par des diagonales spatiales.



Simples nappes cylindriques.

Deux exemples de simple nappe sphérique, coupes et plans.





Intérieur de l'une des portions de sphère d'Eden Project à Bodelva-Cornouailles en Angleterre. Nicholas Grimshaw and Partners architectes.

Coupole du musée maritime d'Osaka au Japon. Paul Andreu avec François Tamisier et Masakasu Bokura architectes.



Les structures tendues et haubanées

Ce type de structure est très ancien. Les nomades du Maghreb ou du Moyen-Orient ont depuis fort longtemps l'usage de grandes tentes en peau. Il y a plus de vingt siècles, les Romains tendaient au-dessus des stades et des cirques d'immenses vélums en toile de lin, renforcés par des filins de chanvre et ancrés dans les maçonneries.

Ci-contre, principe d'une tente nomade, permettant la libre circulation de l'air.





Couverture suspendue du stade olympique de Munich en Allemagne. Frei Otto ingénieur.



Couverture textile suspendue à des mâts.

Pont suspendu d'Akashi au Japon. Portée : 1991 m, record du monde.



Différentes raisons amènent les concepteurs d'aujourd'hui à utiliser des structures tendues :
– le développement des technologies et de matériaux légers de grande résistance : textiles divers, aluminium, plastiques armés, aciers spéciaux, titane… Ceci permet aux concepteurs de réaliser des structures et des enveloppes de plus en plus légères pour franchir des espaces toujours plus vastes. Elles apportent des satisfactions esthétiques et répondent à des besoins nouveaux : enveloppes modulables, escamotables, laissant passer la lumière et libérant les espaces courants de toute contrainte de structure ;
– les structures haubanées constituent une excellente réponse aux reports de charges dans les meilleures conditions à des distances toujours plus importantes. C'est en véhiculant une force par tension simple que le rapport matière-prix est en effet minimal. La traction ou tension simple utilise totalement les capacités résistantes de l'acier et évite les phénomènes annexes de flambement ou de cisaillement. Cette technique permet en outre d'utiliser des matériaux incapables de résister à la compression ou à la flexion, tels que les tissus naturels ou synthétiques, qui travaillent au maximum de leur capacité à la traction.

Les différentes familles de structure tendue

Les structures suspendues

Une structure suspendue est une structure qui reprend le principe de fonctionnement d'une catène. L'architecture issue de la géométrie plane ou à simple courbure (arc et voûte) est remplacée par de nouvelles formes spatiales. Le sens de la courbure des câbles indique celui de la résultante des efforts qui sont repris.

Les charges à considérer sont constituées du poids propre, de la neige, de surcharges constantes ou mobiles, de certaines sollicitations du vent.

Dans le cas où le poids propre de la couverture est supérieur aux sollicitations verticales du vent, les charges peuvent être absorbées par des câbles unidirectionnels ou pluridirectionnels, mais dans le même sens de courbure. Ce sera le cas d'une structure lestée en cylindre, en calotte sphérique ou parabolique suspendue. Le poids de lestage doit être supérieur aux effets de succion ou de soulèvement dû au vent.

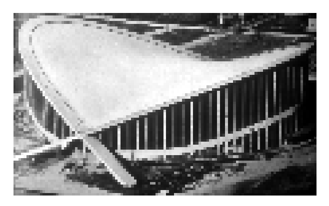
Dans le cas où le poids propre est inférieur aux sollicitations extérieures dirigées vers le haut, c'est-à-dire que le vent devient la charge dimensionnante, la structure tendue devra être réalisée par deux familles de câbles de courbure opposée, formant des surfaces à double courbure. Dans l'hypothèse d'un maillage à câbles, ceux-ci formeront obligatoirement une surface à courbure inverse : par exemple un paraboloïde hyperbolique.
Dans ce type de structure, le poids propre (quelques kg/m^2) est inférieur aux sollicitations extérieures dirigées vers le haut dues au vent.
Le poids propre des structures peut en effet varier de quelques kilogrammes à quelques tonnes :
– voûte en maçonnerie : plusieurs t/m^2 ;
– dalle béton : 300 à 500 kg/m^2 ;
– structure métallique : 20 à 80 kg/m^2 ;
– structure tendue : quelques kg/m^2.

Les structures suspendues lestées

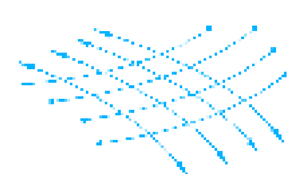
Le lest peut être en béton armé coulé sur support métallique, en bois, en résine… Il est porté par les câbles. Ceux-ci sont toujours désolidarisés du support lesté afin de permettre leur glissement et l'équilibrage des tractions.
La surface de couverture peut par exemple être un cylindre parabolique. Les câbles porteurs sont alors ancrés en tête de poteaux métalliques. Les efforts de traction sont ramenés au sol par des haubans.
La surface de la couverture peut comporter deux courbures de même signe et l'on obtient alors une coque.



Surface à double courbure en paraboloïde hyperbolique.
Cf. Bibliographie [12, p.94].



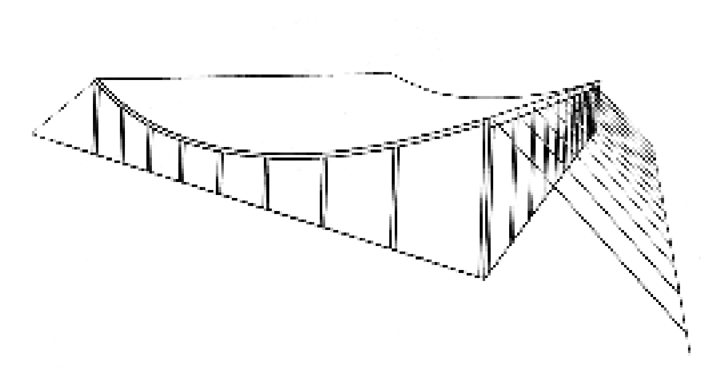
Exemple de structure à double courbure, paraboloïde hyperbolique. Arène de Raleigh Livestock réalisée en 1953 par Matthew Nowici avec l'ingénieur Fred N. Severud.



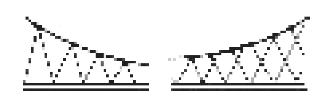
Forces extérieures s'opposant aux dépressions du vent et remplaçant le lestage.



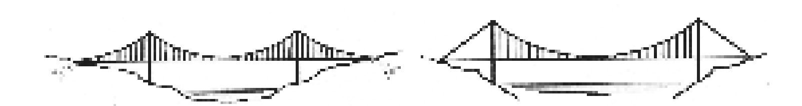
Lestage et vent.



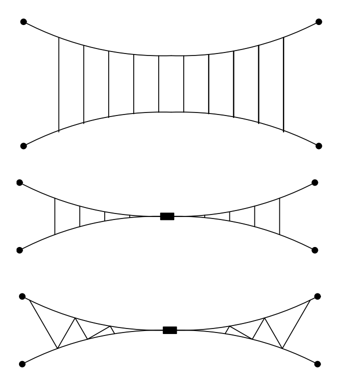
Ci-contre, couverture lestée. Dessin du gymnase de Trinity-School à Londres.



Ponts suspendus : à suspentes obliques, à suspension totale et à suspension centrale.



Les structures suspendues évoquent aussi les ponts de grande portée. Les ponts suspendus sont classés par rapport aux formes caractéristiques de la suspension (totale ou centrale). L'ensemble des charges verticales est absorbé par les câbles porteurs liés au tablier qui transmettent les charges aux câbles principaux ancrés dans les massifs de fondation. Pour des raisons de stabilité aérodynamique les formes des suspentes évoluent vers des dispositions en V ou en X qui permettent d'amortir au mieux les vibrations de la structure.

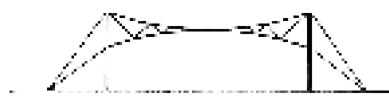


Trois schémas de poutres-câbles avec des câbles de liaison verticaux et diagonaux.
Cf. Bibliographie [10, p.186].

Les structures légères en câbles non lestées

Elles peuvent être réalisées avec des poutres câbles. Dans ces structures, tous les éléments sont tendus. Aucune pièce n'est comprimée ni fléchie. Toutes les sollicitations extérieures sont reprises par des câbles. Suivant les conventions :
– le « câble » appelé « porteur » résiste aux charges de poids propre, neige, surcharges fixes ou mobiles ;
– le câble « tenseur » résiste aux soulèvements dus à l'action du vent.

Différentes figures de structures légères avec des poutres à câbles « porteur » et « tenseur ».



Poutre-câble à une travée



Poutres-câbles à travées continues



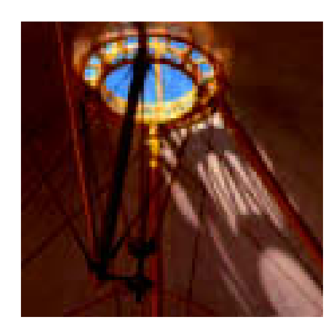
Poutres-câbles en fuseau.

Les deux câbles travaillent simultanément contre les déformations. Ils sont solidarisés au milieu de la portée et liés par des haubans diagonaux. Les poutres câbles peuvent être à une seule trame de 30 m à 100 m de portée. Les poteaux de structure et les ancrages au sol se situent aux extrémités de l'ouvrage. Les poutres-câbles peuvent être réalisées en série de plusieurs travées continues. Chaque travée s'appuie alors sur une poutre métallique perpendiculaire aux poutres-câbles.

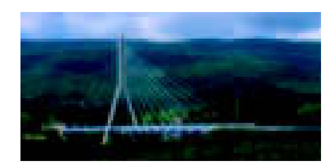
Pour certaines réalisations, on utilisera plutôt des poutres à câbles rayonnants. On reprend dans ce cas de figure le principe de fonctionnement des roues de vélo, avec des câbles tendus qui transmettent les efforts à un élément de rive en compression qui permet d'éviter la mise en place de haubans d'ancrage.

Il existe aussi les maillages ou filets de câbles. Dans ce cas de figure, les câbles sont placés suivant une seule nappe ou surface. Les câbles porteurs et les câbles tenseurs forment deux familles sensiblement orthogonales. Leurs courbures sont inverses. Cette technique a été particulièrement développée par les ingénieurs Frei Otto en Allemagne et René Sarger en France.
Toute surface à double courbure inverse peut être utilisée pour réa-

liser un maillage de câbles. Le paraboloïde hyperbolique (ou PH) est très utilisé en câbles tendus puisqu'il répond à la nécessité d'équilibrer deux efforts opposés : la portance et le soulèvement.
Les rives peuvent être souples (rives constituées de câbles) ou rigides (rives constituées de poutrelles en acier ou en bois). Elles permettent l'ancrage des câbles, l'arrêt du revêtement d'isolation et d'étanchéité, et canalisent les eaux de pluie vers les points bas. Elles permettent aussi l'appui des façades.



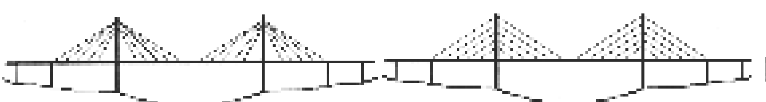
Couverture textile haubannée.



Pont à haubans à Seyssel.

Les structures haubanées

Les structures haubanées concernent essentiellement les ponts. Le haubanage est l'élément fondamental assurant le fonctionnement statique de la structure. Il existe trois façons de fixer les haubans en tête de pylône : en éventail, en harpe ou en semi-éventail.
Chaque câble reprend une partie du poids du tablier (ou de la structure horizontale) et, du fait de leur inclinaison par rapport à la verticale, ils provoquent une compression dans le tablier. À noter que les efforts de compression doivent s'équilibrer, d'où la symétrie du haubanage par rapport au pylône. Ceci explique également le mode de montage usuel de ce type d'ouvrage à partir du pylône.



Haubanage longitudinal : en éventail, en harpe et en semi-éventail.

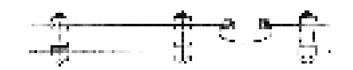
Les matériaux utilisés dans les structures tendues

Les matériaux de structure sont les tubes, les profilés, les câbles toronnés ou à fils parallèles, ou les barres pleines. Actuellement, le câble toronné non galvanisé ou gainé en plastique est le matériau le plus performant et le plus économique.
Le platelage de couverture peut jouer différents rôles :
- simple parapluie : il devra résister mécaniquement aux charges climatiques;
- couverture complète : il devra résister mécaniquement aux charges climatiques, assurer une parfaite étanchéité, être isolant thermiquement et phoniquement.

Il peut comporter différents composants. Les matériaux porteurs seront autoportants de câble à câble, ils devront résister au feu, à la corrosion et au vieillissement. Les tôles d'acier nervurées galvanisées ou laquées peuvent répondre à ces exigences. Sont aussi utilisées les tôles d'aluminium et les plaques translucides de plexiglas, de polycarbonate, de métacrylate, de polyester armé, de verre. Les matériaux d'étanchéité sont les multicouches soudées, les étanchéités polymérisées armées de tissus de verre, les membranes.

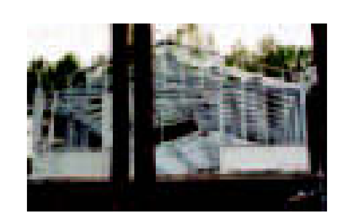


Détail de la couverture du stade de Saint-Ouen.

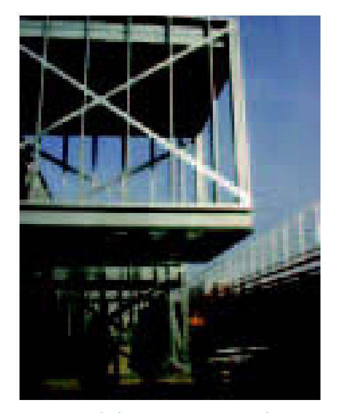


Détail de la couverture du stade de Munich en Allemagne, montrant les joints souples entre les éléments.

Les ossatures légères



Montage d'une structure légère sur un socle en béton. Maison dans les Landes, Joxe Aranguren architecte.

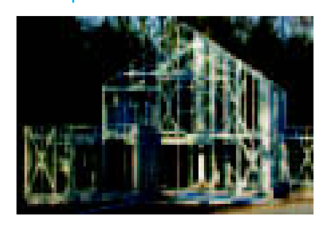


Ossature légère avec un porte-à-faux nécessitant une reprise sur profilés standards. Cité Manifeste à Mulhouse D. Lewis, Scape architecture+Block.



Poteau et poutre en profil mince, logements cité Manifeste à Mulhouse. Ateliers Jean Nouvel arch.

Maison prototype à Liège, Belgique. Véronique Salmon architecte.



Inspirée par la construction à ossature bois, la construction en ossature légère en acier est faite à base de profils minces galvanisés. Elle est couramment utilisée en Amérique du nord et au Japon. Les profils laminés à froid ont une section en forme de C de U, de Z ou de sigma. L'épaisseur de la tôle varie de 0,6 à 2,5 mm, ce qui leur confère une grande légèreté, de l'ordre de 0,075 kN/m au maximum. Leur assemblage peut se faire par divers procédés : par vis autotaraudeuses posées à l'aide de visseuses portatives, par clous fixés par pistolets pneumatiques, par boulons ou par clinchage.

On compose ainsi des ossatures formées de montants verticaux, en général espacés tous les 60 cm, et de traverses horizontales sur lesquelles on vient fixer des éléments plans : bardages, plateaux supports de bardage ou parements extérieurs, plaques de plâtre ou de fibres pour les finitions intérieures.

Les façades peuvent être habillées avec un parement de métal, de bois, de brique, d'enduit..., de même que les couvertures peuvent être construites avec n'importe quel matériau : tuiles en terre cuite ou métalliques, panneaux... On peut aussi associer cette ossature légère à des profilés traditionnels et ouvrir ainsi les possibilités de conception : porte-à-faux, étages multiples, grande baie vitrée, etc.

Des trous dans les montants verticaux permettent de faire passer câbles, tuyaux et réseaux à l'intérieur des murs ou des cloisons. Le contreventement peut être réalisé avec des écharpes diagonales ou avec des panneaux plans.

Différents systèmes de montage existent. Les profils minces peuvent être livrés sur le chantier par fagots coupés à la longueur voulue, puis assemblés sur place par vissage ou boulonnage. Quelques jours suffisent à une petite équipe pour monter l'ossature d'une maison sur une chape de fondation. On peut aussi préassembler en atelier des éléments voire des panneaux entiers de grande dimension pour simplifier le montage sur place et améliorer la qualité de finition.

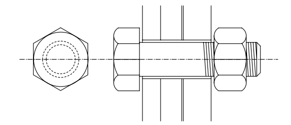
On peut ainsi réaliser des constructions jusqu'à deux étages, très légères et qui résistent bien aux sollicitations sismiques. Le procédé est bien adapté pour la construction de maisons individuelles ou de petits équipements (hôtels, bureaux...). Les performances thermiques et acoustiques de ce type de construction sont excellentes, grâce à la possibilité d'optimiser la nature et l'épaisseur de l'isolant placé à l'intérieur des murs et sur leur face externe, de jouer sur l'épaisseur et le nombre de plaques de plâtre et moyennant certaines précautions dans le montage (désolidarisation des planchers, joints résilients...).

Les assemblages

Les types de liaison

Les assemblages sont classés en deux grandes catégories :
– assemblages « mécaniques » : boulons, vis, rivets… ;
– assemblages « adhérents ou cohésifs » : soudure, collage…
Les assemblages concernent des éléments structurels – poteaux, poutres, diagonales de contreventement, tirants – ou des matériaux de partition ou d'enveloppe. Ils représentent une fraction significative du coût d'une ossature métallique.

En plus de leur fonction de liaison, qui consiste à assurer la continuité des efforts transmis, ils jouent un rôle esthétique très important quand ils sont visibles. Ils sont particulièrement mis en valeur lorsqu'ils montrent le fonctionnement structurel du bâtiment.



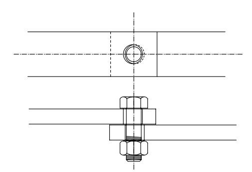


Schéma d'assemblage mécanique par boulon avec écrou.

Assemblages mécaniques

Les boulons

Les boulons peuvent être utilisés en atelier ou sur le chantier. Ils sont assez couramment mis en œuvre. Un boulon comporte une tête hexagonale, un corps cylindrique fileté qui constitue la vis et un écrou également hexagonal. Les rondelles, freins d'écrou, contre-écrou font partie des accessoires des assemblages. Les jeux dans les trous sont de 1 à 2 mm. Ils travaillent soit en traction, soit au cisaillement. Le serrage d'un boulon ordinaire se fait soit manuellement, soit avec une clé, soit pneumatiquement.



Structure en profils minces boulonnés. Viaduc espace info à Millau. M. Abergel et J. Carchon architectes.

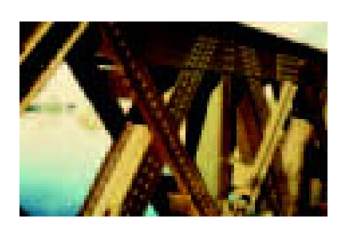
Les boulons à haute résistance (HR) et à serrage contrôlé sont plus efficaces. Le serrage d'un boulon HR crée entre deux pièces une pression qui s'oppose au glissement par frottement. Ce type de boulon est principalement utilisé pour assurer la liaison des composants dans des assemblages soumis à des moments de flexion et des efforts tranchants. Le serrage contrôlé de ce type de boulon se fait par une clé dynamométrique (munie d'un appareil de mesure de l'effort). L'assemblage par boulons HR est plus facile à mettre en œuvre sur un chantier que la soudure. Les boulons font l'objet d'une certification en matière de caractéristiques géométriques et mécaniques.

Les rivets

Le rivetage a été longtemps le seul procédé d'assemblage utilisable en construction métallique (par exemple pour la tour Eiffel). Développé dès la fin du XVIIIe siècle pour la confection des chaudières, très largement développé à

Exemples d'assemblages : rivet à tête sphérique, rivet à tête fraisée, boulon, XIXe siècle.

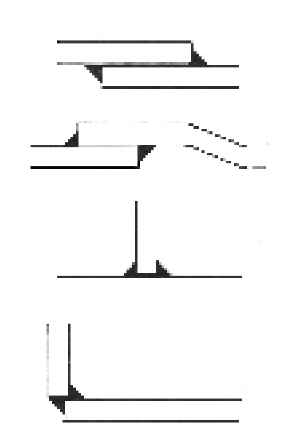




Pont en fer riveté à Bayonne, 1860.

partir de 1850, il est complètement abandonné aujourd'hui pour les assemblages sur les chantiers sauf dans les cas de rénovation de bâtiments anciens ou de ponts.

Un rivet se présente comme un gros clou à une tête. Il doit être préalablement chauffé au rouge, puis posé à chaud. Une fois l'autre tête formée à la masse, au marteau pneumatique ou à la presse hydraulique, le rivet se contracte en se refroidissant ce qui assure ainsi une force de serrage et un assemblage par frottement des deux pièces entre elles. Procédé efficace et très sûr, il exige cependant beaucoup de main d'œuvre.



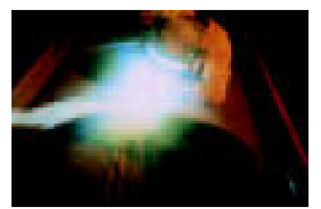
Différents types de soudures.

Assemblages adhérents ou cohésifs

Le soudage

Le soudage consiste à fondre l'acier localement avec ou sans apport de métal (toujours de l'acier) de manière à reconstituer une continuité de la matière aussi parfaite que possible. Le procédé le plus courant en construction métallique est la soudure à l'arc qui utilise la chaleur produite par un arc électrique pour porter l'acier à la température de fusion.
Le soudage est un procédé très efficace mais qui peut exiger un contrôle *a posteriori* des pièces assemblées (examen visuel, rayons X...). Une partie des soudures est le plus souvent réalisée en atelier, parfois sur des bancs automatisés (par exemple pour les PRS). La plupart des entreprises de construction métallique est aujourd'hui bien équipée en bancs de soudage.
Les positions de soudage peuvent s'effectuer pour des pièces :
- à plat bout à bout ;
- à plat superposé ;
- à plat d'angle.

Soudure de deux demi-poutrelles pour fabriquer une poutre alvéolaire.



Le collage

Encore expérimental, le collage de pièces métalliques ne s'emploie en pratique que pour des pièces d'enveloppe où les contraintes mécaniques à prendre en compte sont faibles (par exemple raccord d'angle pour un bardage). Néanmoins les progrès très importants réalisés ces dernières années dans les colles laissent prévoir un grand développement de ce type d'application.

Les types de liaison

On distingue plusieurs types de liaison, suivant les éléments reliés :
– appui au sol d'un poteau ;
– liaison poteau-poteau ;
– liaison poteau-poutre ;
– liaison poutre-poutre ;
– liaison dans les poutres treillis ;
– liaison poutre-voile en béton armé ;
– nœud dans les structures spatiales.

Appui au sol d'un poteau

Pied de poteau articulé

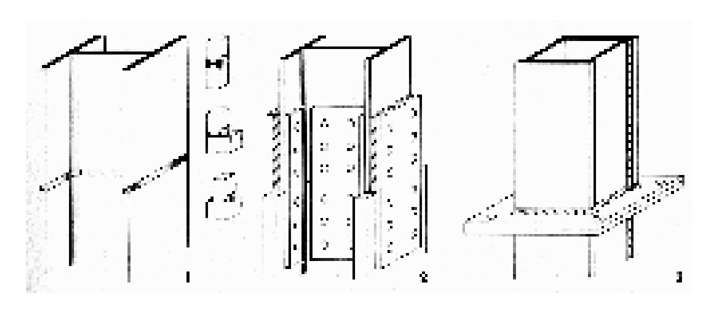
La mise en œuvre la plus courante consiste à souder une platine à l'extrémité du poteau. Elle est traversée par deux tiges d'ancrage et repose sur l'élément de fondation en béton. Même si la liaison semble rigide, elle fonctionne en fait comme une articulation (cf. p. 23).
Il est quelquefois nécessaire de souder sous la platine un tronçon de profilé appelé « bêche » pour transmettre l'effort horizontal au massif de fondation.

Pied de poteau encastré

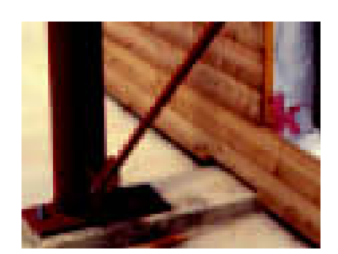
La platine soudée à l'extrémité du poteau est traversée par quatre tiges ancrées dans le béton. Afin que les contraintes soient admissibles et les déformations faibles pour un encastrement, il est nécessaire de choisir des platines épaisses ou des platines minces mais raidies (cf. p. 24).

Liaison poteau-poteau

Les joints de montage permettent de réaliser le raccordement de différentes parties d'un même poteau (par soudure, par éclisses ou par platines). Il peut y avoir continuité et modification des formes en même temps.



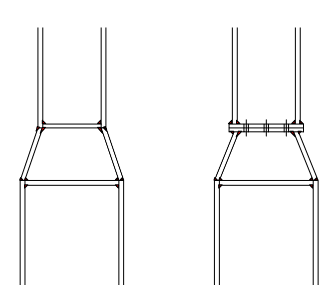
Ci-contre, trois types de liaisons poteau-poteau
1- Soudage bout à bout des tronçons
2- Liaison par éclisses boulonnées
3- Liaison par platines d'extrémités soudées.



Pied de poteau articulé.



Pied de poteau encastré.

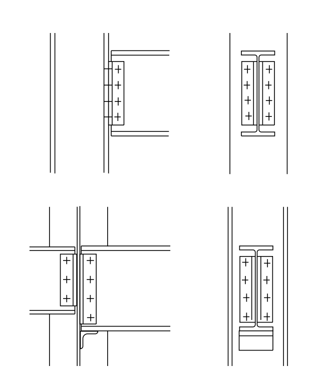


Joints de continuité de poteaux de section variable, soudé (à gauche), assemblé (à droite).

Liaison poteau-poutre

Assemblages par appui simple

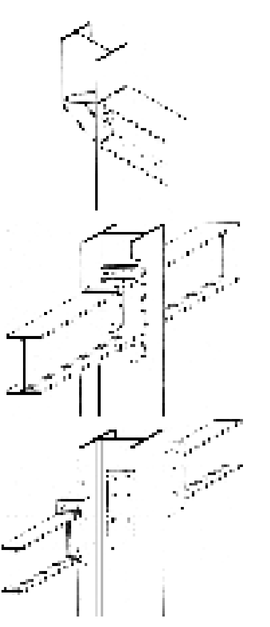
Ce type de liaison est par exemple mis en œuvre à un joint de dilatation. La poutre prend appui sur le poteau, mais elle conserve un mouvement libre horizontal (cf. p. 23).



Ci-contre : assemblages articulés par cornières boulonnées (élévation et coupe).

Assemblage articulé

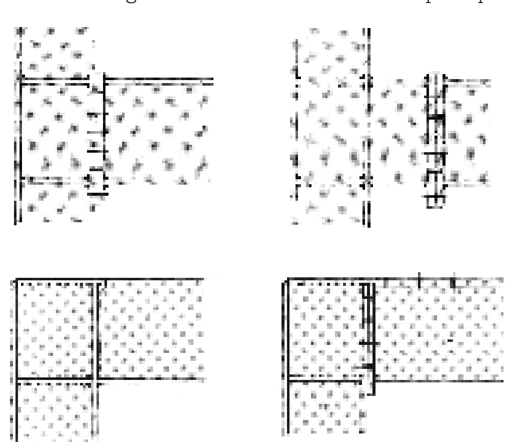
L'attache d'une poutre sur un poteau est considérée comme articulée quand la flexibilité des cornières de liaison autorise de faibles rotations. La poutre est assemblée au poteau au niveau de son âme. De cette manière, les semelles supérieures et inférieures de la poutre sont libérées et ne transmettent pas d'effort couplé de traction et de compression, et par conséquent pas de flexion (cf. p. 23).



Assemblages rigides poteau-poutre
– par assemblage soudé (en haut) ;
– par cornières boulonnées et éclisses soudées (au milieu) ;
– par plaques d'about soudées aux poutres et boulonnées au poteau (en bas).
Cf. Bibliographie [12, p.142].

Assemblage par encastrement

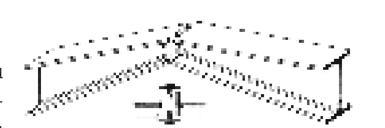
Dans le cas de continuité de poutres ou de poteaux, la liaison est complètement rigide. L'encastrement poteau-poutre peut se faire par soudure directe. On renforce ainsi la fixation. Sinon on utilise une platine et on boulonne les pièces, au niveau des semelles en particulier.
Aux angles des portiques, les poutres sont considérées comme encastrées sur le poteau. L'assemblage reconstitue la continuité du portique.



Ci-contre : liaisons rigides poteau-poutre
– encastrements boulonnés sur le chantier, directement sur le poteau et avec liaison décalée sur des amorces de poutres (en haut) ;
– nœud rigide en tête de portique, soudé en usine et boulonné sur le chantier (en bas).

Liaison poutre-poutre

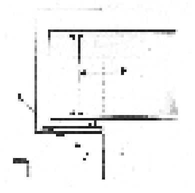
La liaison peut être articulée ou encastrée (cf. croquis p. 24). L'articulation au faîtage de deux demi-portiques est un cas fréquent dans les halles à rez-de-chaussée. Dans le cas des nœuds rigides de portique, la liaison de la poutre au poteau peut s'effectuer en retrait de l'intersection des lignes d'épures géométriques pour des raisons techniques ou architecturales.



Traverses de portique articulées, avec axe libre dans deux coquilles cylindriques soudées.

Liaison dans les poutres treillis

Les assemblages peuvent être soudés ou boulonnés. Il existe de nombreuses possibilités avec les profils du commerce. Les assemblages entre tubes se font par soudage : en « gueule de loup » pour les poutres en tubes ronds, à coupes planes quand les membrures sont hexagonales ou carrées.



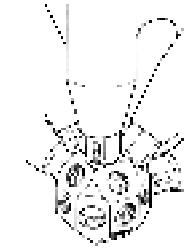
Appui simple de poutre sur un mur ou un voile en béton armé.

Liaison d'une poutre métallique avec une paroi en béton

L'attache de la poutre peut s'effectuer de trois manières différentes : par des corbeaux en béton formant une console ; par l'engagement des abouts des poutres dans des logements réservés dans le béton avec des dispositifs d'appui ; par des platines noyées dans le béton sur lesquelles sont fixés les abouts de poutre par âme de liaison ou corbeaux pré-soudés en atelier.

Nœuds dans les structures spatiales

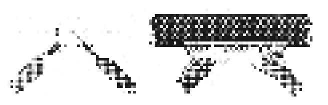
Dans les structures spatiales, les sections les plus adaptées au travail de traction et à celui de la compression sont les profils creux ronds.



Nœud Méro.

Assemblages sur des sphères

Les profils creux ronds concourent au centre de la sphère et sont soudés. Ils peuvent aussi être vissés et boulonnés dans la sphère creuse (ex. nœud Méro).

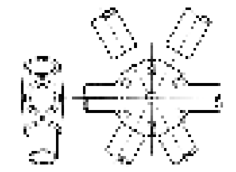


Assemblage de tubes par goussets aplatis.

Assemblages par aplatissement de tubes et goussets soudés

Un des procédés consiste à souder sur les membrures des goussets en tôle dans les directions des barres dont les extrémités sont aplaties de manière à permettre l'attache par soudure ou boulonnage.

Système de nœud tridimensionnel Stéphane Duchâteau.



Les nœuds à coquilles

Le système Stéphane Duchâteau est formé de coquilles en acier moulé enserrant plusieurs tubes. Les joints sont soudés.

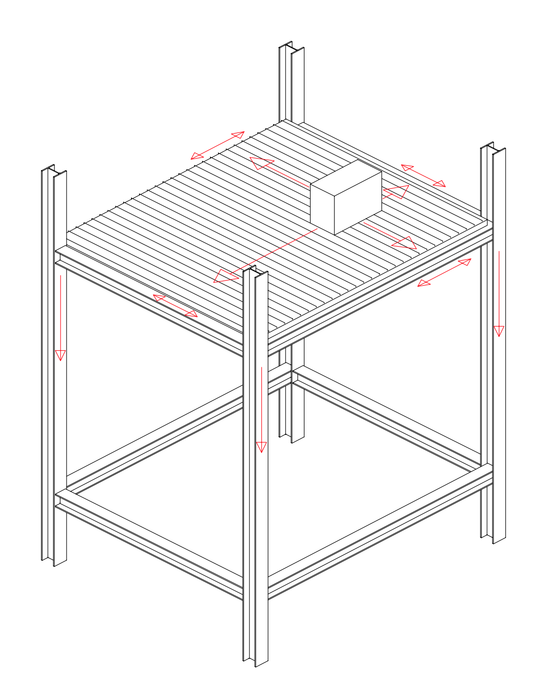
5 LES PLANCHERS

Les planchers ont pour rôle structurel de transmettre les charges et surcharges de fonctionnement du bâtiment aux éléments principaux de l'ossature. Ils participent aussi à la stabilité globale du bâtiment et peuvent assurer le contreventement horizontal.

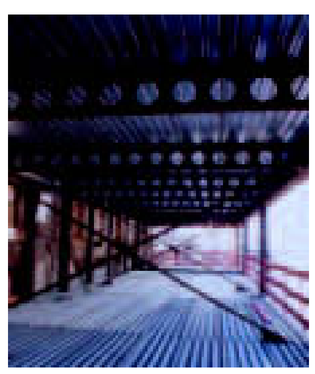
Les planchers doivent répondre à des cahiers des charges précisant :
– les performances thermiques ;
– les performances acoustiques ;
– le degré de résistance au feu ;
– le cheminement des réseaux et la position des installations techniques ;
– les possibilités de fixation du faux-plafond ainsi que des installations techniques ;
– les modes de vibration en cas de charges dynamiques.

On distingue dans les planchers la dalle et la poutraison (ou solivage).
La dalle peut être :
– en béton armé ou précontraint ;
– en béton coulé sur des bacs acier formant coffrage perdu ;
– en béton coulé sur des bacs acier collaborants ;
– en plancher sec composite acier/autre matériau (bois, plâtre...) ;
– en dalle mixte acier-béton préfabriquée.

Ci-contre : schéma de report des charges d'un plancher vers les poteaux en passant par les poutres.



Bacs acier pour plancher collaborant posé sur des poutres alvéolaires.



Les dalles béton

On distingue les dalles en béton armé coulées en place sur un coffrage, les dalles en béton coulées sur des prédalles, les dalles préfabriquées et les dalles alvéolaires précontraintes.

Pour optimiser la dalle et les poutres, il est intéressant d'assurer une connexion entre ces deux éléments. Il existe plusieurs moyens pour assurer l'adhérence entre les poutres et la dalle. Lorsque la dalle et la structure métallique de support collaborent pour résister ensemble aux efforts, on parle de structure mixte.

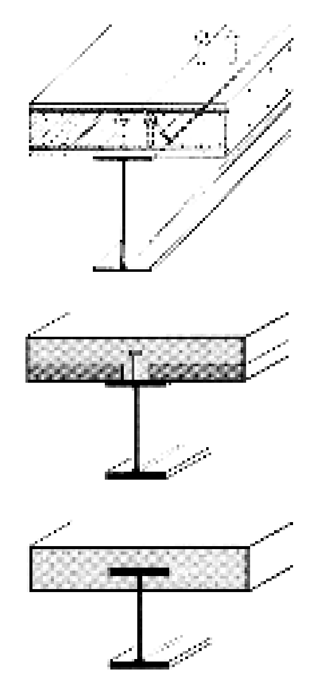
La mixité peut être assurée par :

– des connecteurs. Ils accroissent les surfaces de contact entre les aciers et le béton ;

– l'incorporation de l'aile haute du profilé dans la dalle ;

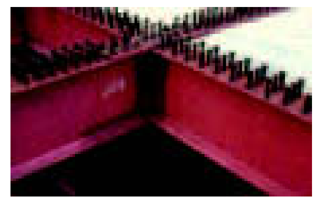
– l'enrobage de la poutrelle et son incorporation dans la dalle en béton armé.

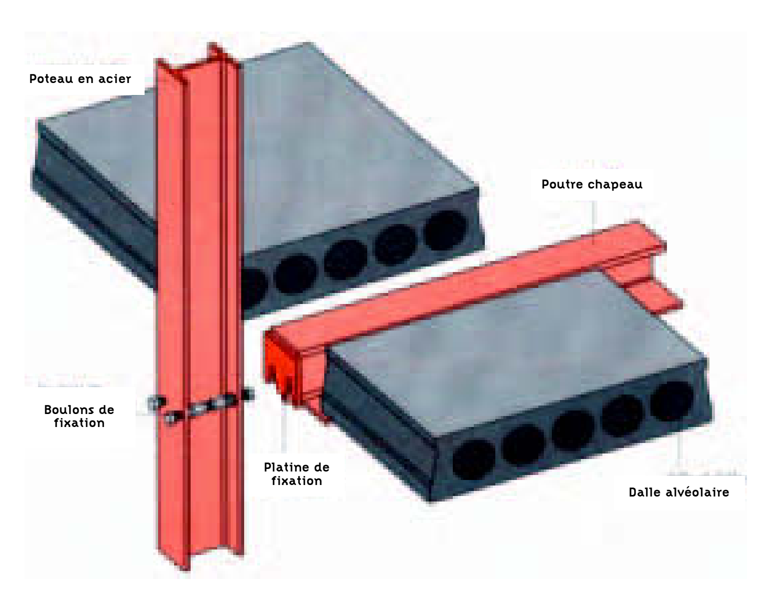
Les dalles alvéolaires précontraintes se posent sur l'aile inférieure des poutres. Elles peuvent atteindre 12 m de portée.



Différents types de dalle béton sur poutrelles acier :
– dalle reposant sur un profilé avec connecteurs de liaison (en haut) ;
– prédalle avec connecteurs et dalle de compression (au milieu) ;
– dalle incorporant l'aile supérieure du profilé (en bas).

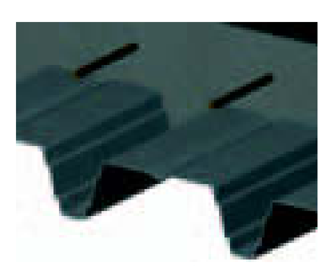
Structure mixte :
détail de connecteurs soudés sur la poutraison, avec prédalles béton en attente de la dalle de compression à couler en place.



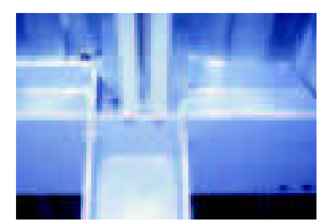


Ci-contre : plancher en dalles alvéolaires précontraintes posées sur une poutre asymétrique de type IFB (Integrated Floor Beam).

Les dalles sur bacs acier



Bac en acier galvanisé de type Toitesco formant un coffrage pour la dalle en béton.

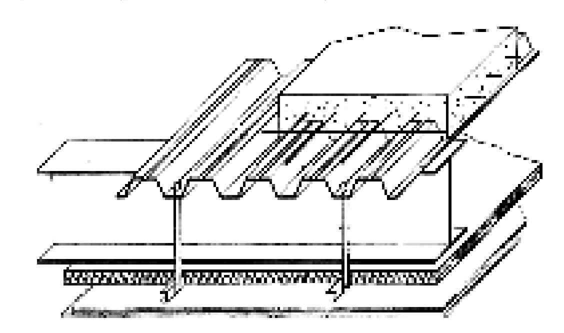


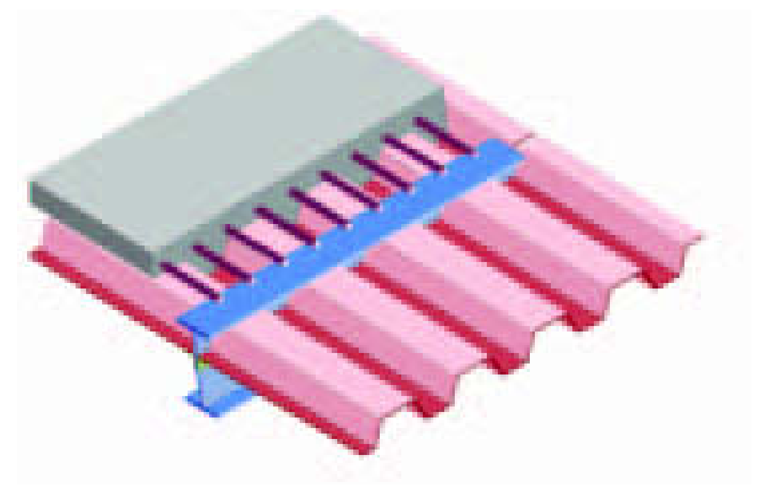
Détail de pose d'un bac acier sur la semelle basse de la poutre.

Ci-contre, deux exemples de plancher béton sur bac acier :
– bac acier posé sur la poutrelle, avec faux plafond suspendu au bac (en haut) ;
– bac acier posé sur des cornières soudées sur l'âme de la poutre (en bas). Cette solution permet de réduire la hauteur totale du plancher.

Les planchers non collaborants comportent des bacs en acier galvanisé formant coffrage pour la dalle en béton. Ils permettent :
– d'assurer un coffrage efficace et étanche en supprimant les opérations de décoffrage ;
– de constituer une plateforme de travail avant la mise en œuvre du béton ;
– d'éviter souvent la mise en place d'étais et ainsi de gagner du temps car en reprenant la charge de béton coulé en place ils ont une fonction structurelle.

Le positionnement du bac par rapport à la poutre de support peut se faire de deux manières :
– le bac peut être fixé sur la poutre en partie supérieure ;
– le bac peut être incorporé dans la hauteur de la poutre, posé sur des cornières ou posé sur l'aile inférieure. Pour poser le bac sur des cornières, il convient que celles-ci débordent de la largeur de la semelle supérieure. Dans la pose sur l'aile inférieure, l'emploi d'une poutre à large semelle est une autre réponse à ce problème (poutrelles IFB ou SFB).





Les dalles avec bacs collaborants

Ce type de dalle consiste à associer deux matériaux pour qu'ils participent ensemble, par leur « collaboration », à la résistance à la flexion. Ces planchers associent une dalle de compression en béton armé à des bacs nervurés en acier galvanisé travaillant en traction comme une armature. Pour éviter le glissement entre les nervures du profil en acier et le béton, les parois latérales des bacs sont embouties ou crantées. Si elles sont en acier, les solives peuvent être rendues solidaires de la dalle en béton par l'intermédiaire de connecteurs soudés ou cloués pour constituer une poutre mixte. Une dalle collaborante peut aussi être posée sur des poutres simples (sans connecteurs).

Le résultat est une économie de béton et d'acier donc, plus globalement de poids. La rapidité de montage est supérieure à celle des systèmes traditionnels. Les planchers collaborants sont très performants pour la flexibilité et le potentiel d'évolution du bâtiment.

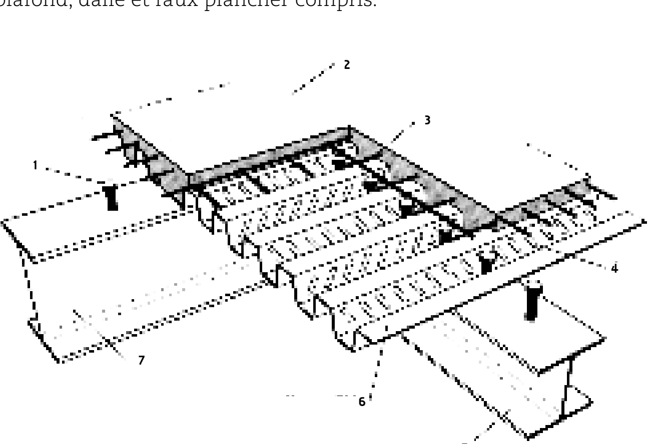
Les bacs collaborants sont généralement utilisés pour des portées entre solives variant de 2 m à 7 m avec une épaisseur de dalle variant dans un bâtiment courant de 8 à 30 cm. La largeur maximale des bacs est de 1 m. Les épaisseurs de tôle varient de 0,75 mm à 1 mm. Les portées du plancher lui-même peuvent atteindre 18 m, avec des épaisseurs de plancher de seulement 95 cm, faux plafond, dalle et faux plancher compris.



Bac acier collaborant de type Cofrastra avec un profil d'ondes en queue d'aronde crantées pour solidariser l'acier et le béton.



Bac acier collaborant de type Cofraplus à profil trapézoïdal ouvert muni de bossages.



Vue éclatée d'un plancher mixte.
1. Connecteur soudé
2. Béton coulé en place
3. Treillis d'armature
4. Bossages sur les parois latérales
5. Solives
6. Tôle profilée en acier galvanisé ou prélaqué
7. Poutre

Cf. Bibliographie [12, p.130].



Bac acier avec connecteurs soudés au droit des solives.



Plancher collaborant en cours de coulage avec étais provisoires.





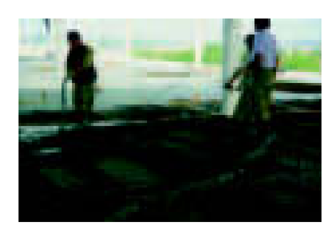
Plancher collaborant avec bacs acier posés sur les solives.



Plancher collaborant avec bacs posés sur des cornières soudés sur les ailes des solives.



Plancher collaborant en attente de coulage de la dalle béton, avec costières d'arrêt au droit de la trémie (ci-dessus et ci-contre).



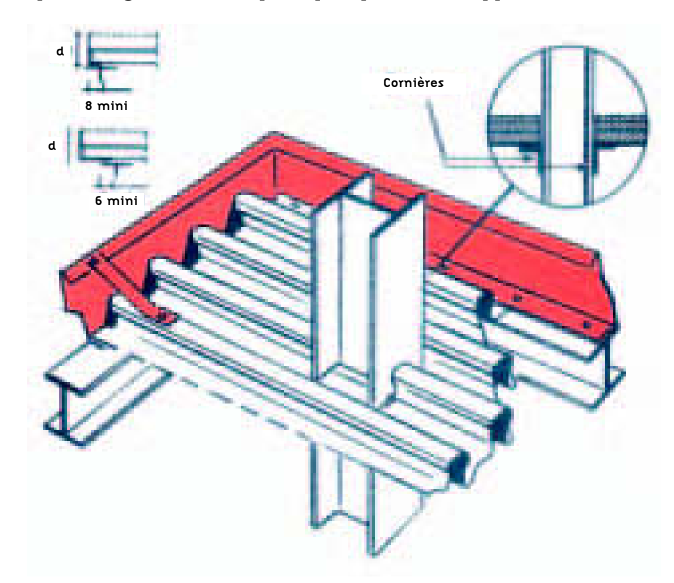
Bétonnage à la pompe de la dalle de compression en béton.

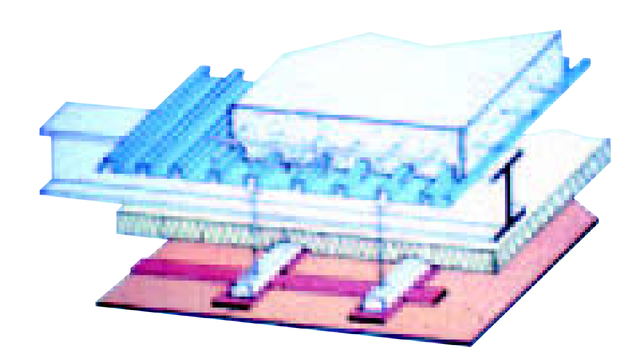
Ci-contre : schéma de principe d'un plancher collaborant avec isolation et plafond suspendu aux bacs acier.

Les bacs peuvent être posés et fixés :
– sur la poutre ;
– sur des cornières soudées sur l'âme de la poutre.
Dans ce cas il convient de gruger l'aile supérieure pour permettre l'insertion du bac entre les âmes des poutres.

Lors du coulage du béton, la rive du plancher est bordée par une costière en acier galvanisé, appelée « bande d'arrêt de coulage », de la hauteur du plancher collaborant pour contenir le béton au niveau fini du plancher à réaliser.

Dans des locaux industriels ou tertiaires simples, la sous-face du bac acier simplement galvanisée ou prélaquée peut rester apparente.



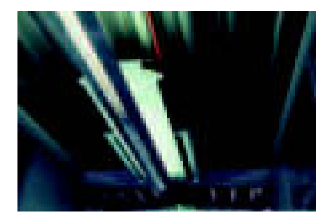


Pour répondre aux exigences acoustiques, thermiques ou de tenue au feu du plancher, il convient en général de lui associer d'autres matériaux. Ceux-ci assureront également un parement fini adapté aux locaux à traiter. Ils sont constitués essentiellement de :
– laines minérales ; l'épaisseur de la laine varie en fonction de la nature des locaux superposés (isolation phonique) ;
– plaque(s) de plâtre ; l'épaisseur de la ou des plaques de plâtre varie en fonction de la performance acoustique.

Grâce à l'effet masse-ressort-masse associant la masse de la dalle en béton, un isolant et un plafond en plaques de plâtre, la capacité d'isolation acoustique peut atteindre 62 db(A), bien supérieure à une dalle classique en béton.

Sans protection particulière, la résistance au feu des dalles collaborantes est de 30 minutes sans dispositions particulières. On peut facilement atteindre 120 minutes en disposant des armatures supplémentaires dans les creux des ondes des bacs. Avec une protection adaptée des structures, l'ensemble dalle + poutre atteint aussi cette résistance.

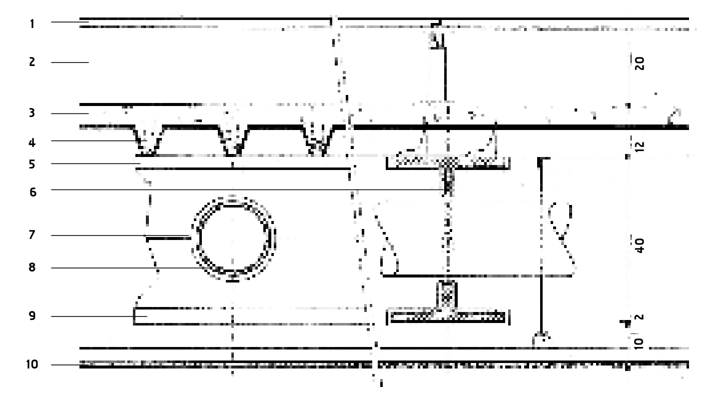
Dans certaines conditions (acoustique, tenue au feu), le plenum (espace entre la laine et la sous-face du plancher) est utilisé pour faire circuler des gaines :
– un chauffage électrique rayonnant peut être installé sous la forme d'un film dans lequel est intégré une résistance, inséré entre la plaque (de plâtre ou d'un autre matériau adapté) et la laine ;
– un circuit d'eau (chaude ou froide) interposé également entre le faux plafond qui sera constitué de dalles minérales et la laine. Il peut servir à chauffer ou à rafraîchir les locaux situés sous le plafond ;
– les réseaux électriques et informatiques ainsi que les gaines de ventilation.



Intégration des réseaux et de l'éclairage dans la sous-face du plafond avec bacs acier apparents.



Passage des gaines techniques dans les poutres alvéolaires des planchers. Les poutrelles sont floquées pour en assurer la stabilité à l'incendie.



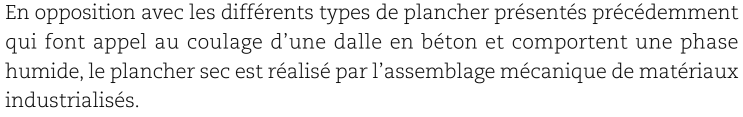
Ci-contre, coupe de principe sur un plancher mixte – acier-béton avec bac acier –, faux plancher et plafond suspendu. Les réseaux passent dans le plenum à travers les poutrelles alvéolaires.

1. Plancher technique sur verins
2. Plenum
3. Plancher collaborant sur bac acier
4. Connecteur type Hilti
5. Semelle haute PRS, 1/2 IPE 450
6. Protection enduit projeté
7. Réservation
8. Passage de gaine
9. Semelle basse PRS, 1/2 HEB 340
10. Plafond suspendu.

Les planchers secs



Montage d'un plancher sec sur bacs acier. Logements à Evreux, Dubosc et Landowski architectes.



En opposition avec les différents types de plancher présentés précédemment qui font appel au coulage d'une dalle en béton et comportent une phase humide, le plancher sec est réalisé par l'assemblage mécanique de matériaux industrialisés.

Ses caractéristiques essentielles sont :
– la légèreté : il est cinq fois moins lourd qu'une dalle de 20 cm en béton armé ;
– l'assemblage mécanique de ses composants ;
– les performances acoustiques obtenues, qui sont celles de la NRA (Nouvelle réglementation acoustique).

Le plancher sec est constitué d'un bac métallique qui repose sur les poutres et qui assure seul la fonction portante. Les portées peuvent aller de 2 à 6 m. Dans le cas d'une portée de 6 m, la hauteur du bac est de 20 cm.



Plancher sec en cours de pose.



Sur un plancher sec de type PCIS, on pose au-dessus du bac :
– un résilient ;
– un panneau de bois de particules solidarisé avec le bac en acier ;
– deux plaques de plâtre ou un panneau de bois/ciment.

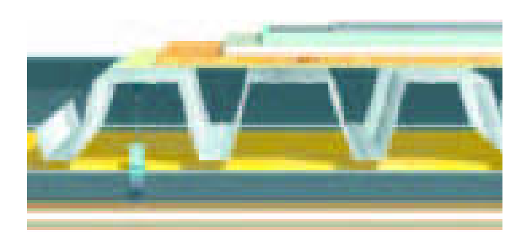
Et en sous-face du bac :
– une couche de laine minérale ;
– une ou deux plaques de plâtre, ou une plaque de silicate de calcium.

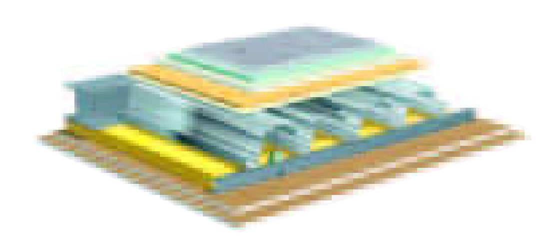
Aux avantages précédemment cités, il convient d'ajouter :
– la rapidité de montage ;
– l'absence d'étaiement freinant l'avancement du chantier ;
– la flexibilité ;
– l'autonomie thermique des locaux, puisque le plancher intègre un isolant.

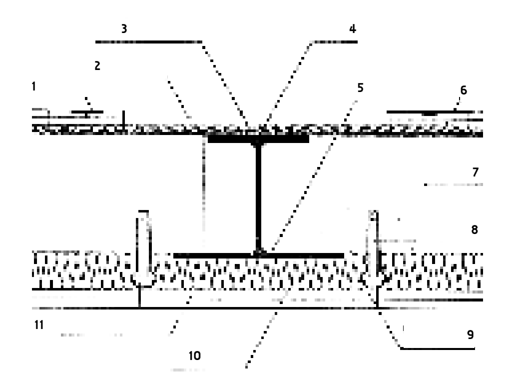
Dans un souci de cohérence et de logique, il conviendra d'utiliser les espaces creux et les interfaces des matériaux pour faire circuler des gaines techniques ou incorporer un film chauffant électrique. Il est néanmoins souvent nécessaire de prévoir un contreventement horizontal complémentaire, ce type de plancher ne pouvant pas généralement assurer cette fonction.



Ci-contre : système de plancher préfabriqué en usine de type Cofradal 200 composé d'un double bac acier portant un isolant acoustique et thermique et une dalle en béton armé.
Les éléments d'une épaisseur totale de 200 mm sont livrés par largeur de 1,20 m pour une portée de 7,50 m maxi. Ils sont stables au feu 120 mn et offre une isolation phonique de 58 db(A) aux bruits aériens.







Ci-contre, coupe sur plancher

1. Revêtement de sol
2. Plaque plâtre 13 mm avec enduit
3. Plaque plâtre 13 mm
4. Panneau de Triply 12 mm, vissé
5. Poutrelle asymétrique
6. Voile de verre
7. Bac acier 200 mm de hauteur
8. Suspente
9. Ossature faux plafond
10. Isolant
11. 2 plaques de plâtre de 13 ou 15 mm.

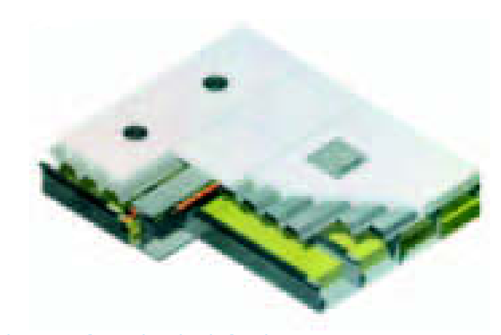
Coupe et axonométrie sur le système de plancher composite interactif sec PCIS développé par l'agence Dubosc & Landowsky

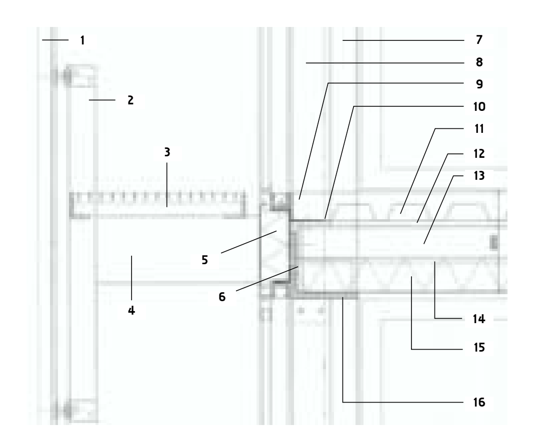
Les bacs acier reposant sur l'aile inférieure des solives reçoivent un plancher composite en bois et supportent un faux plafond isolé, pour un degré coupe-feu pouvant atteindre 60 mn avec isolant laine de roche 70 mm et plaque de plâtre 15 mm.



Système de plancher mince développé par l'agence d'architecture néerlandaise Cepezed

D'une épaisseur totale de 330 mm, il comprend une poutrelle asymétrique, des augets en acier galvanisé qui reçoivent l'isolation, puis un bac acier posé sur des bandes de caoutchouc qui supporte une chape en anhydride.





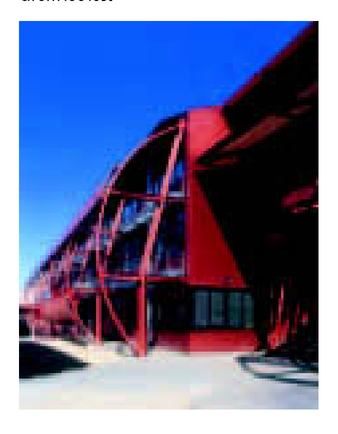
Coupe transversale sur façade et plancher

1. Écran de verre trempé émaillé 10 mm
2. Plat 80x20
3. Caillebotis acier galvanisé
4. Plat HEA 120 galvanisé
5. Couvre-joint aluminium
6. Joint d'étanchéité
7. Poteau 200x200
8. Poteau 120x60
9. Chape anhydrite
10. Costière d'arrêt de coulage de chape
11. Bac nervuré 50 mm
12. Bande caoutchouc
13. Auget acier galvanisé 200 mm
14. HEA 120
15.Isolant laine de roche 100 mm
16. Cornière 200x200x16.

6 LES FAÇADES

En façade, l'acier remplit de multiples fonctions : ossature secondaire d'éléments vitrés ou opaques, remplissage, bardage… La grande variété des produits d'habillage ou de vêture et des produits en acier disponibles pour les façades a permis le développement d'enveloppes métalliques dans les programmes les plus divers : bâtiments industriels, immeubles de bureaux, équipements publics, immeubles de logements… Cette variété tient à la diversité des formes, aspects et dimensions liées aux modes de fabrication mais aussi à la gamme des finitions possibles.

Collège André-Maurois à Limoges. Enveloppe en acier laqué de couleur cuivrée. É. Dubosc et M. Landowski architectes.



Dans la continuité et en cohérence avec les planchers composites, la façade assemblée entre dans la même logique de composants industrialisés assemblés sur le site du chantier. La façade fait partie de la filière sèche, les standards industriels conditionnent en termes de fiabilité et de qualité la fabrication de ces éléments. Par ailleurs, la mise en place de ces matériaux permet de s'affranchir plus rapidement des intempéries et d'assurer la sécurité du bâtiment.

En contrepartie, il faut faire preuve de rigueur en conception, en particulier dans les détails répondre avec précision aux difficultés et aux points singuliers qui se situent au niveau des assemblages entre les différents composants. Par ailleurs, il est nécessaire de bien connaître les standards de manière à éviter les modifications ou adaptation sur le chantier des éléments fabriqués. Des zones de réglage sont tout de même prévues avec des éléments aux dimensions ajustables pour avoir une certaine tolérance sur le chantier.

Avant le montage, la réalisation d'un prototype peut être intéressant pour vérifier les détails d'assemblage, tester les performances du système et aborder les problèmes de pose. Cette étape donne une référence en termes de qualité pour la construction effective de la façade.

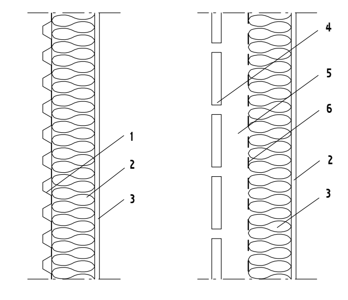
Le contrôle des ambiances

La conception des façades doit tenir compte de différentes contraintes :
– d'étanchéité à l'eau et à l'air ;
– d'isolation thermique et acoustique ;
– de tenue dans le temps ;
– de lumière ;
– de résistance au feu (règle du C+D) et de réaction au feu ;
– de sécurité.
À noter que les façades ne doivent pas fonctionner exclusivement comme des barrières, mais en fait comme des filtres sélectifs et contrôlables. La tendance actuelle est davantage aux systèmes passifs qu'aux systèmes artificiels qui régulent par exemple la température ou la ventilation.

Étanchéité

Pour l'acier, la question de l'étanchéité à l'eau et à l'air est à traiter au niveau des joints entre les composants, car le matériau lui-même est imperméable et protégé contre la corrosion. Les performances de la façade peuvent donc être altérées si un soin particulier n'est pas apporté à la conception des assemblages. Les types de ruissellement d'eau sont multiples. Le cheminement de l'eau peut par exemple se faire du bas vers le haut et les effets du vent qui s'additionnent compliquent le problème à résoudre.

Deux types de réponses existent :
– la façade étanche, à joints étanches qui concerne les façades à châssis et les façades rideaux ;
– la façade à parement extérieur non étanche, qui concerne les façades en bardage, où l'eau peut éventuellement pénétrer en partie la façade pour être ensuite évacuée par le vide d'air ventilé.



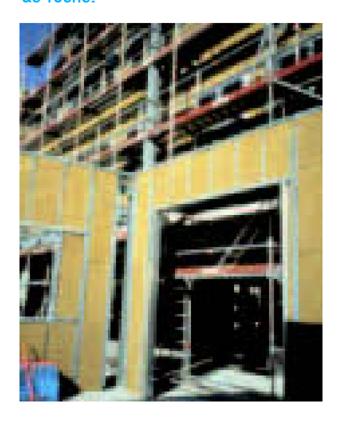
Principes de façade étanche (à gauche) et de façade à parement extérieur non étanche (à droite).
1. Bardage
2. Isolant
3. Parement intérieur
4. Bardage ou parement extérieur
5. Vide d'air
6. Pare-pluie.

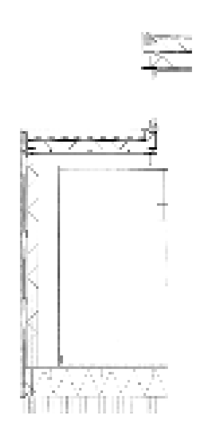
Isolation thermique

En France, la nouvelle réglementation thermique (RT 2000) a accru les exigences de 20 à 40 % en matière d'isolation thermique. Tous les bâtiments chauffés à 12 °C sont assujettis à cette réglementation.

L'acier est un bon conducteur thermique. Il doit donc être associé en façade à un autre matériau isolant. On utilise principalement de la laine de roche ou de verre, de la mousse de polyuréthane ou du polystyrène expansé. Si le doublage des panneaux d'acier en partie courante est aisé, c'est au niveau des fixations et des joints qu'il faut traiter le risque de transfert direct de la température entre parties métalliques en contact avec l'extérieur et l'intérieur. On parle alors de pont thermique. Les pièces métalliques sont généralement dédoublées et reliées par une pièce isolante. La condensation est favorisée quand la température de la surface extérieure

Montage d'une façade légère composite avec isolant en laine de roche.





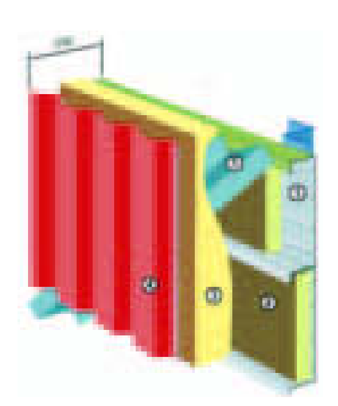
Coupe type d'un mur à isolation extérieure.

est froide et que la pression intérieure de vapeur d'eau est importante. Si elle apparaît à l'intérieur de la façade dans une zone non ventilée, des désordres importants peuvent survenir à terme provoqués par la corrosion de l'acier. Pour réduire et réguler le phénomène, il convient de faire baisser d'abord la pression de vapeur d'eau puis de faire baisser la température intérieure.

Pratiquement, on trouve de l'intérieur vers l'extérieur : un doublage à la température de l'intérieur (par exemple une plaque de plâtre peinte ou revêtue) ; un film pare-vapeur étanche à la vapeur d'eau (film plastique) ; un isolant thermique ; éventuellement un pare-pluie puis un vide d'air ; et enfin la paroi extérieure. En fait, le point de rosée doit être dans ce vide d'air ventilé.

Isolation acoustique

L'isolation acoustique nécessaire dépend du type de bâtiment et du classement sonore de l'environnement défini par les pouvoirs publics suivant la nature des voies et des activités adjacentes. Les performances à obtenir sont définies en France par la NRA (Nouvelle règlementation acoustique), ainsi que les labels Qualitel et Qualitel Confort Acoustique.



Principe de façade double peau avec structure intermédiaire et isolation acoustique renforcée (49 dB(A) en bruit rose)
1- Plateau de bardage
2- Laine minérale dense 140 kg/m^3
3- Laine minérale
4- Bardage extérieur
5- Structure intermédiaire.

La capacité d'une paroi à s'opposer à la transmission du bruit est caractérisée par son indice d'affaiblissement acoustique, noté R. Plus R est grand, plus la paroi est isolante. Mesuré en laboratoire sur un échantillon normalisé, cet indice varie suivant la fréquence du son. On distingue :
– « R_{rose} » : isolement de la paroi pour un bruit ayant la même puissance dans toutes les fréquences ;
– « R_{route} » : isolement de la paroi pour un bruit ayant une puissance plus importante dans les fréquences basses (moteur, roulement, échappement…) ;
– « R_w » : comparaison par rapport à un spectre de référence européen.

Les performances sont fonction de la nature et de la pose du revêtement extérieur, de la nature, de l'épaisseur et de la densité de l'isolant, du parement intérieur (le plus souvent constitué d'une ou plusieurs plaques de plâtre posées en quinconce), de la distance entre les parements et de la nature des liaisons (vis, écarteurs…). Une paroi n'étant en général pas homogène, le R global est très influencé par le plus faible des composants. Les parois à ossature acier peuvent dépasser un R de 61 dB (A), en jouant sur l'effet masse-ressort-masse. Le confort acoustique d'une pièce dépend aussi de sa capacité d'absorption et du temps de réverbération Tr. Si les parois sont très réfléchissantes, le Tr sera long, si elles sont absorbantes, le Tr sera court. Pour le logement il est de 0,5 s. Pour améliorer le coefficient d'absorption, on peut utiliser des surfaces perforées, éventuellement doublées d'un isolant intérieur.

La composition de la façade

Les façades sont constituées d'un assemblage d'éléments industrialisés associés en couches successives pour répondre à trois fonctions essentielles : le parement extérieur (vêture de la façade) ; l'âme de la façade (isolation) ; le parement intérieur (parement de finition).
La nature des façades diffère généralement suivant l'usage des locaux, la nécessité de les isoler thermiquement et/ou phoniquement et le type de finition intérieure recherchée.


Façade en tôle d'acier inox de l'atelier presses de l'usine de Marle à Nogent-en-Bassigny. Philippe Guyard architecte.

Le parement extérieur

Il a pour fonction de constituer le « fini » du bâtiment et bien souvent d'assurer son étanchéité à l'eau. Les éléments utilisés en parement sont la plupart du temps des produits industrialisés légers que le concepteur choisit dans la gamme des fabricants et sur lesquels il a peu de possibilités de modification. En revanche, la taille des éléments, leur calepinage, leur fixation, le traitement des joints, la couleur et leur texture permettent une très grande variété de composition et de modénature.


Parement à ondes sinusoïdales obtenu par le pliage de tôles en acier. Aéroport de Bordeaux, France. Luc Arsène-Henry architecte.

La pose sera effectuée conformément aux prescriptions techniques attachées à chaque matériau. Les performances d'une façade sont normalisées suivant un classement AEV (air, eau, vent).
Tous les matériaux de vêture peuvent être posés sur un bâtiment en charpente métallique. Il est préférable qu'ils soient légers pour optimiser la charpente mais des panneaux lourds peuvent aussi être posés.

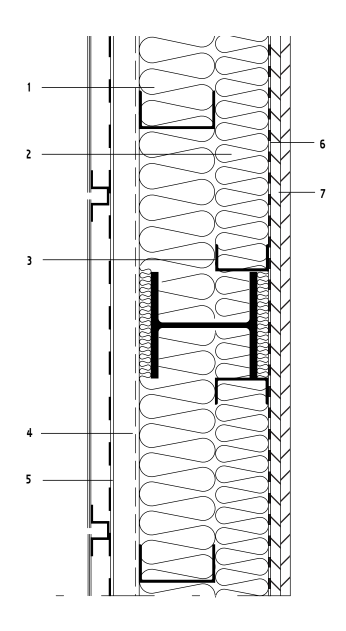
Matériaux métalliques tels que :
- tôle nervurée ou plane en acier ou en inox ;
- tôle nervurée ou plane en aluminium ;
- feuille de zinc ;
- feuille de cuivre ;
- feuille en inox…

Matériaux d'aspect minéraux issus de l'industrie :
- panneaux préfabriqués en béton ;
- béton de fibre de verre ;
- revêtements silico-calcaire ;
- ciment-bois ;
- granulats et résine ;
- PVC…

Bardage de tôle laquée. Miracle Planet Enschede, Pays-Bas. I/AA architectes.



Matériaux naturels :
- pierre ;
- bois…



L’âme de la façade

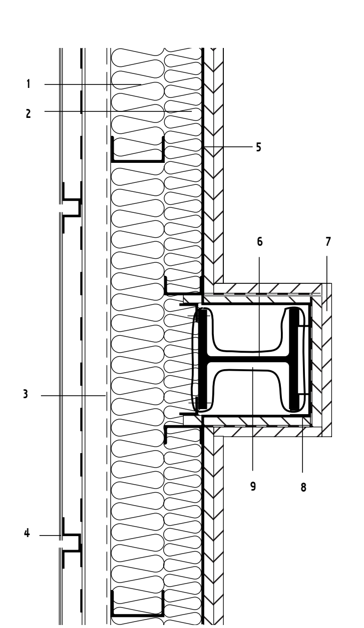
Elle est constituée d’un isolant thermique, en général réalisé par la pose de deux couches de laines minérales à joints verticaux croisés. Ces laines sont semi-rigides ou rigides et hydrophobes. L’épaisseur de l’isolant varie suivant les zones géographiques et la destination du bâtiment, soit de 80 à 160 mm dans nos régions tempérées.

La pose se fait en deux couches. La première, côté extérieur de la façade, passe devant le nez de plancher pour éviter les ponts thermiques à ce niveau. La deuxième couche est déployée de plancher à plafond. Les couches de laine sont toujours posées entre les ossatures métalliques.
La fixation des laines sur ou entre les ossatures secondaires de façade est très importante pour éviter leur tassement dans le temps. Ces tassements provoqueraient des ponts thermiques importants et par conséquent une chute des performances thermiques de la façade, accompagnée de désordres tels que condensation, moisissures, champignons.

Le parement intérieur

Dans les bâtiments de bureaux ou de logements, le parement de finition intérieur du volume habitable est en général constitué de plaques de plâtre fixées sur l’ossature qui maintient la deuxième couche de laine minérale intérieure. En fonction des isolations et de la stabilité au feu demandée suivant le classement du bâtiment, le nombre, l’épaisseur et la nature des plaques de plâtre sont variables.

La plaque de plâtre est un complément très utile de la mise en œuvre des structures en acier. La plaque de plâtre est mince, légère, facile à poser. Elles sont en général fixées par vis mais il existe aussi des cloueuses capables de les fixer par clous sans fissuration de la plaque. Les plaques les plus courantes ont des épaisseurs de 13, 15 et 18 mm (BA 13, BA 15 et BA 18).



En haut : coupe-type sur un poteau dans un logement (poteau intérieur au mur)
1. Isolant, épaisseur 100 mm
2. Isolant, épaisseur 70 mm
3. Montant pour le BA 13 tous les 60 cm
4. Pare-pluie
5. Lisse support du parement : profil 10 mm
6. Pare-vapeur
7. BA 13.

En bas : coupe-type sur un poteau dans un bureau (poteau saillant)
1. Isolant, épaisseur 80 mm
2. Isolant, épaisseur 48 mm
3. Pare-pluie
4. Lisse, profil de 30 mm
5. Pare-vapeur aluminium
6. Poteau HEB ou HEA
7. 2 BA 13
8. Fixation doublage
9. Flocage.

Les types de façade

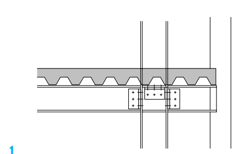
Le positionnement de la structure par rapport à la façade peut se faire de trois manières :

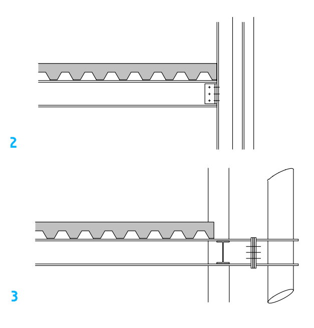
– à l'intérieur de la façade (schéma 1). Dans ce cas si le poteau est caché on recherchera la solution la plus économique. Si le poteau est vu, il conviendra d'étudier et de soigner l'esthétique du poteau ainsi que son assise : liaison au sol et liaison avec la charpente si elle est également visible, en ayant pour souci l'économie générale du projet ;

– dans l'épaisseur de la façade (schéma 2). Il peut être unique ou décomposé. Le mode d'attache et de support de la poutre de structure du plancher qui sort de la façade doit être soigneusement étudié ;

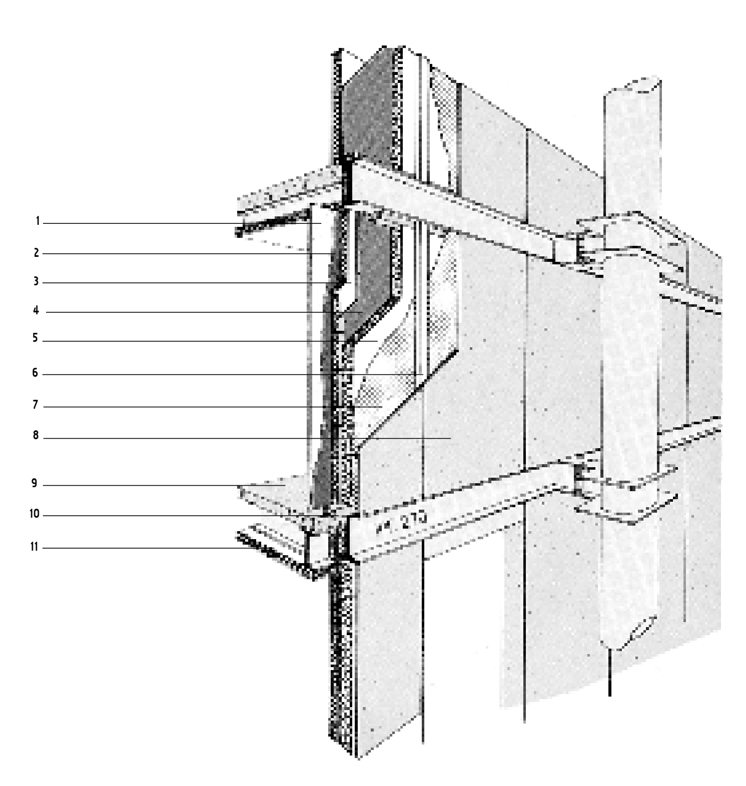
– à l'extérieur de la façade (schéma 3). Il convient alors de traiter les ponts thermiques au niveau des poutres.

Dans les trois cas, la façade peut être lourde ou légère.

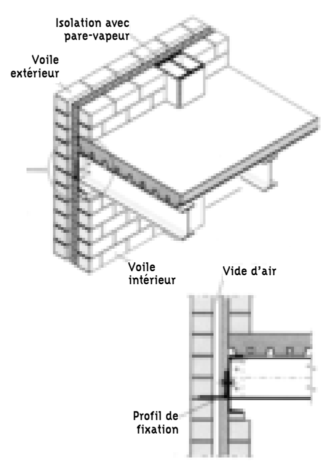




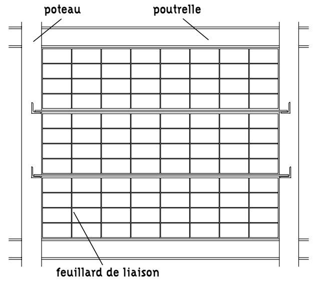
Différents positionnements de la structure par rapport à la façade :
1- à l'intérieur
2- dans l'épaisseur
3- à l'extérieur.



Ci-contre, exemple de structure à l'extérieur de la façade. Castel-Eiffel à Dijon. É. Dubosc et M. Landowski architectes
1. Plaque de plâtre BA 13
2. Pare-vapeur
3. Polystyrène
4. CTBX-aggloméré
5. Panneau de laine minérale semi rigide
6. Tasseau de recouvrement 36 x 60
7. Pare-pluie
8. Parement extérieur
9. Plancher prédalle de 60 + dalle de 60
10. Lisse en bois 100 x 36
11. Faux plafond.



Façade en maçonnerie sur ossature acier et détail de pénétration de la poutre.



Principe de liaison entre la charpente et la paroi maçonnée.

Façade légère en cours de montage.



Façades lourdes

La façade est lourde quand le remplissage d'enveloppe entre ou devant les poteaux et les poutres est de type maçonné : briques, parpaings… L'amarrage des matériaux de ce type sur la structure porteuse s'effectue au moyen d'une structure secondaire ou de pattes en inox soudées sur la structure en inserts dans les joints horizontaux des lits de maçonnerie. La façade en elle-même n'est pas porteuse car c'est la structure métallique qui transmet la descente de charge du bâtiment. Le remplissage peut en revanche participer au contreventement du bâtiment.

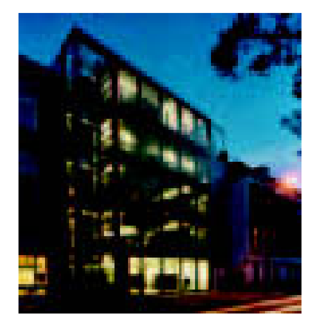
Façades légères

Dans le cas d'une ossature de bâtiment du type voiles transversaux ou points porteurs ponctuels, il existe trois possibilités autres que le remplissage des façades par de la maçonnerie :
– une façade rideau ;
– des panneaux de façade pour fermer les vides entre composants de structure ;
– un bardage.
Les façades légères se caractérisent par :
– un poids léger, souvent inférieur à 100 daN/m^2, qui permet entre autres des espacements entre poteaux importants. On peut obtenir alors une transparence maximale ;
– une faible épaisseur ;
– une fonction non porteuse qui complète de manière adéquate le système de structure porteuse poteaux-poutres et qui confère à la façade une indépendance complète entre façade et structure ;
– l'existence d'une ossature secondaire qui assure le transfert des charges de la façade à l'ossature principale du bâtiment ;
– l'emploi de produits industriels ;
– l'assemblage de composants avec des joints permettant leur libre dilatation thermique.
En contrepartie, l'exécution se doit d'être préparée en amont pour une précision optimale, notamment pour ce qui concerne les joints.
L'ossature secondaire est quant à elle en forme de grille avec des éléments verticaux appelés montants et des éléments horizontaux appelés lisses. Les efforts de charge permanente étant verticaux, les efforts du vent étant horizontaux perpendiculairement à la façade, et la dilatation se faisant verticalement et horizontalement dans le plan de la façade, l'ossature secondaire doit être conçue pour pouvoir absorber les mouvements dans les trois directions.

Les façade rideau et façade panneau

Façade rideau

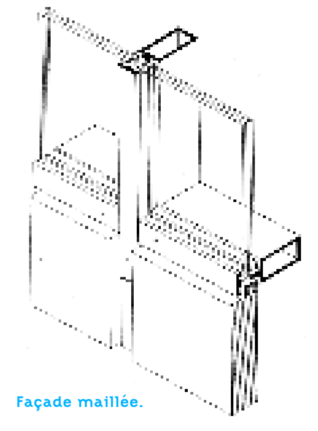
La façade rideau se compose d'une ou plusieurs parois filant généralement en continu en avant du plancher. Elle n'a pas de fonction porteuse et transmet donc les charges horizontales de vent et son poids propre à une ossature secondaire, puis à celle du bâtiment par le biais de ses fixations. L'ossature secondaire est généralement composée de lisses verticales ou horizontales qui doivent être hiérarchisées lors de la phase de conception.
Les éléments de remplissage ne dépendent pas de l'ossature. Ils peuvent être en bois, en verre, en métal... Fabriqués en usine, ils ont des dimensions précises avec une tolérance de l'ordre du millimètre. Cette précision est irréaliste sur le chantier. Il faut donc prévoir un réglage possible dans les trois directions pour les fixations des composants entre eux pour reprendre les écarts supérieurs au millimètre. De plus, la dilatation thermique de la façade devant être libre, des jeux sont prévus dans les fixations.



Façade rideau. Immeuble de bureaux réalisé par Cepezed à Delft, Pays-Bas.

Façade maillée

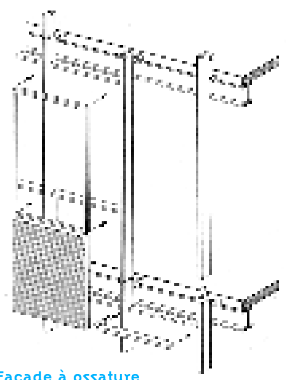
S'il n'y a pas hiérarchisation entre éléments horizontaux et verticaux, on parle alors de façade maillée, forme caractéristique des façades rideaux. Il est préférable quand cela est possible de fixer la façade aux poteaux plutôt qu'aux poutres de plancher. On évite de cette manière les déformations liées à la flèche du plancher. La liaison avec l'ossature se fait à l'intérieur de la façade. On améliore donc l'étanchéité à l'eau et à l'air ainsi que l'isolation thermique. Il convient de traiter avec soin l'isolation acoustique entre les locaux.



Façade maillée.

Façade à ossature verticale

Si les éléments verticaux deviennent porteurs, ils marquent généralement le dessin de la façade, les éléments horizontaux restant peu affirmés. On parle de façades à meneaux. Les éléments verticaux sont généralement de la hauteur d'un étage.
Si les poteaux de la structure principale sont suffisamment rapprochés, on évite alors d'avoir des meneaux et on fait l'économie d'une famille d'éléments. Les liaisons avec l'ossature verticale se font par l'extérieur de la façade. La liaison avec l'ossature horizontale se fait par contre à l'intérieur de la façade.
La question d'étanchéité à l'eau et à l'air, d'isolation thermique, sont à traiter avec soin. Il n'y a en revanche pas de problème acoustique entre locaux voisins au même niveau.



Façade à ossature verticale (à meneaux).

Façade en bandes.

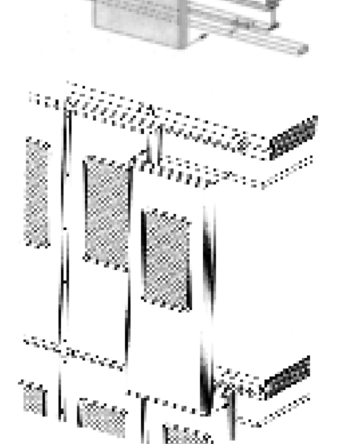


Façades à ossature horizontale

Lorsque la façade est à bandes, ce sont les éléments horizontaux qui deviennent porteurs. Ils sont en dehors de la façade soit en tête des allèges et en partie basse des retombées, soit uniquement sur l'allège si cela est possible. La liaison avec l'ossature verticale se fait à l'intérieur de la façade et on supprime généralement les montants verticaux secondaires pour éviter d'avoir recours à des joints coulissants qui reprennent les variations de cotes entre planchers.

Pour traiter la question acoustique il est possible de prévoir une interruption de la peau intérieure à chaque plancher et à chaque élément porteur vertical. Les délais d'exécution seront en revanche plus longs et la façade est alors plus épaisse et plus lourde.

Façade panneau



Façade en panneaux préfabriqués, installés directement sans profils porteurs et raidisseurs.

La façade panneau est constituée de panneaux insérés entre deux planchers consécutifs que l'on emploie sans ossature secondaire ni raidisseur. Les panneaux peuvent avoir un module de la hauteur d'un étage et donc filer horizontalement sans être interrompus par la structure verticale. Dans le cas contraire, il faudra prêter attention aux joints pour garantir les performances d'isolation thermique et d'étanchéité à l'eau et à l'air.

Il existe deux types de panneaux de remplissage en acier :
– les panneaux simples, assemblés sur chantier avec un isolant thermique ;
– les panneaux composites qui comportent à la fois les parements intérieur et extérieur et l'isolant thermique.

On emploie généralement les gammes de panneau qui existent dans les catalogues des fabricants mais il est toujours possible de concevoir un panneau spécifique au projet de construction.

Façade en panneaux simples (cassettes).



Les panneaux simples

Ils sont fabriqués avec une tôle en acier, la plupart du temps plane mais raidie par pliage des bords, formant soit des lames emboîtées soit des cassettes à joints creux. Ils sont fixés sur une ossature secondaire et on complète le dispositif par une isolation thermique et des plaques de plâtre.

Ils peuvent être plans, pliés en angles ou cintrés, voire emboutis. Les dimensions des panneaux ne dépassent pas généralement 4 m de longueur et 1,5 m de largeur. Ils peuvent être réalisés en acier prélaqué ou en inox. On peut les poser horizontalement ou verticalement.

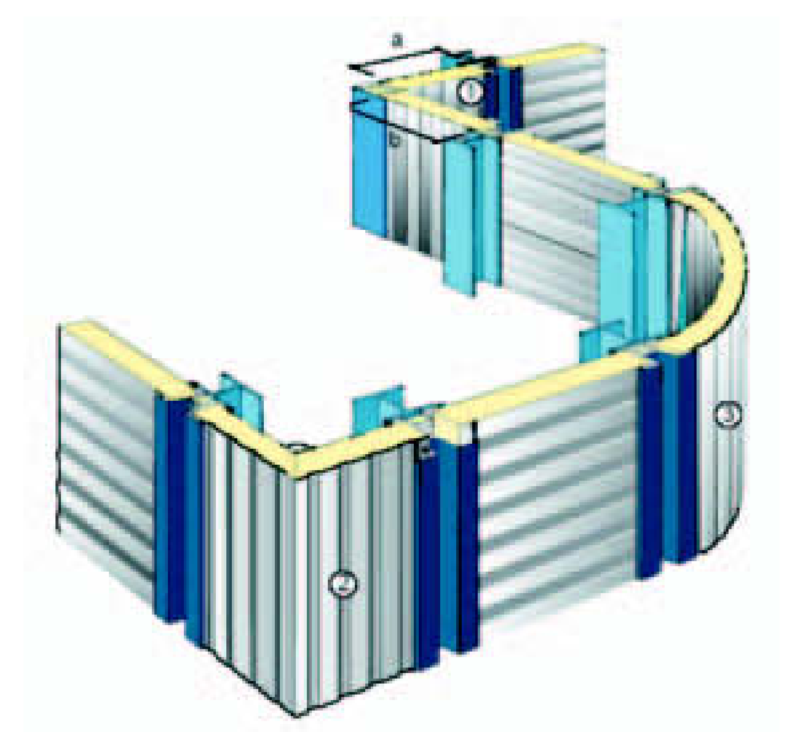
Les panneaux composites

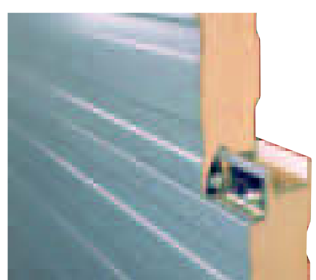
Le panneau composite (ou panneau sandwich ou encore panneau moussé) est constitué d'un parement en acier plan ou nervuré associé à une seconde feuille d'acier. Le vide intérieur est injecté d'une mousse de polyuréthane ou de laine minérale (coupe feu) pour obtenir une âme isolante thermiquement. L'épaisseur de ces panneaux varie de 30 mm à 200 mm (pour chambres froides). Une épaisseur de seulement 70 mm de polyuréthane permet de satisfaire largement à la RT 2000.

Le parement extérieur est prélaqué ou en inox, le côté intérieur peut être simplement galvanisé s'il n'est pas visible. On distingue les panneaux composites où l'isolant a une fonction structurelle de ceux où il n'en a pas. Ces panneaux sont dans tous les cas très rigides en flexion et peuvent donc porter sur 3 à 5 m entre deux lisses d'une ossature secondaire. Leurs dimensions maximales sont de l'ordre de 1,2 m par 6 m pour les panneaux plans, de 1,2 m par 15 m pour les panneaux à face nervurée. En fonction de la finition de ses chants, le panneau peut être utilisé comme remplissage en s'insérant dans une grille porteuse ou comme panneau de bardage.



Panneaux sandwich en façade, fixés sur une ossature secondaire en bois. Maison à Paris 19e, Georges Maurios architecte.





Panneau-sandwich à fixations cachées.

Ci-contre : assemblage de panneaux-sandwich sur une ossature métallique
1- Panneau droit
2- Panneau d'angle
3- Panneau cintré.

Les bardages



Exemple de façade bardage assemblée sur une structure de plancher sec.

Il s'agit d'un système où les éléments en tôle d'acier nervurée sont juxtaposés par recouvrement. La ventilation et le drainage sont les deux notions à intégrer dans tout type de bardage.

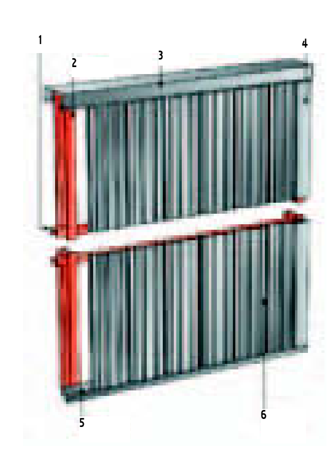
De l'intérieur vers l'extérieur on a successivement le parement intérieur, le film pare-vapeur, l'isolant thermique, éventuellement le pare-pluie (puis le vide d'air si besoin) et le parement extérieur en acier. Quand la façade est conçue avec un vide d'air, celui-ci assure la ventilation et fait ainsi disparaître la condensation et permet progressivement d'équilibrer la pression de part et d'autre du parement extérieur. Ensuite le drainage permet d'évacuer l'eau de l'intérieur de la façade quand le parement n'assure pas l'étanchéité.

Prévu initialement pour les réalisations industrielles, le bardage intéresse, depuis quelque temps déjà, de plus en plus d'architectes pour des programmes multiples : logements, équipements publics… En effet, les détails de réalisation sont relativement simples et le coût de ce type de système est faible.

Un bardage peut en général se poser soit verticalement soit horizontalement. Il peut se cintrer par crantage. Une gamme d'accessoires vient compléter les nombreuses gammes de profils existants : angles collés, cintrés par crantage, fixations, bavettes, plaques d'éclairement ou hublots...

La protection de la surface est réalisée par une peinture appliquée en continu et cuite au four. Il existe de nombreuses nuances et types de peinture.

Bardage simple peau
1. Lisse de bardage
2. Ossature principale
3. Couronnement d'acrotère
4. Angle plié
5. Bavette rejet d'eau
6. Paroi extérieure.



Bardage simple peau

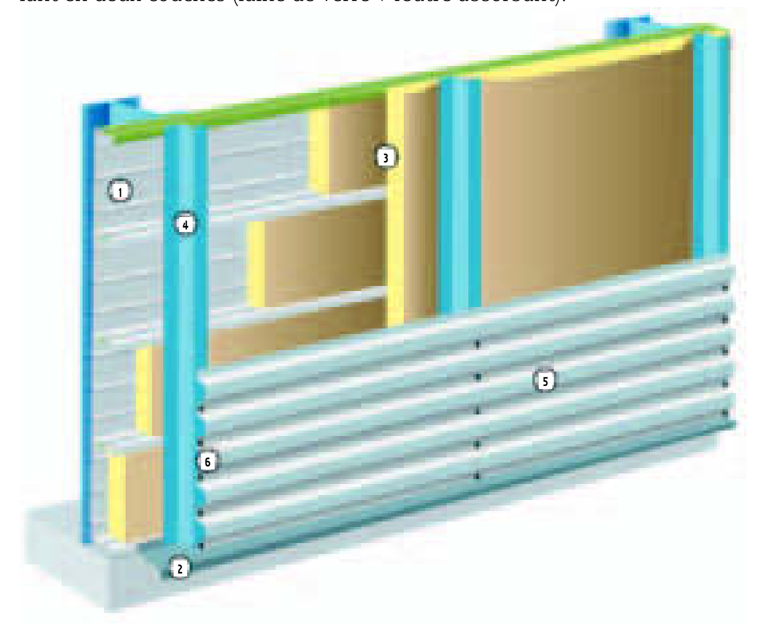
Il se compose d'une paroi métallique fixée sur l'ossature secondaire constituée de lisses horizontales ou de montants verticaux. L'espacement entre lisses ou entre montants dépend de l'épaisseur de la tôle et de la section des nervures. Il sert dans la construction de hangars ou d'entrepôts pour lesquels il n'y a pas besoin d'isolation thermique ou acoustique.

Comme revêtement d'un mur en béton ou en maçonnerie il intervient aussi comme protection mécanique d'une isolation posée extérieurement. On met alors un isolant thermique et on fixe le bardage à l'aide de profils en Z ou en oméga.

Bardage double-peau

Il comporte un parement extérieur en acier et un parement intérieur composé de plateaux en acier fixés sur l'ossature principale. On obtient la configuration la plus simple en laissant les plateaux apparents en intérieur. Les

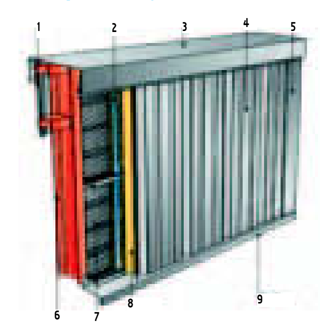
plateaux de bardage permettent de mettre en place l'isolant, de ménager le vide d'air nécessaire et de supporter le parement extérieur. Le parement intérieur peut être perforé afin d'améliorer l'absorption acoustique intérieure. L'affaiblissement acoustique peut être amélioré grâce à l'emploi d'un isolant en deux couches (laine de verre + feutre absorbant).



Ci-contre : pose d'un bardage double peau sur des plateaux horizontaux.

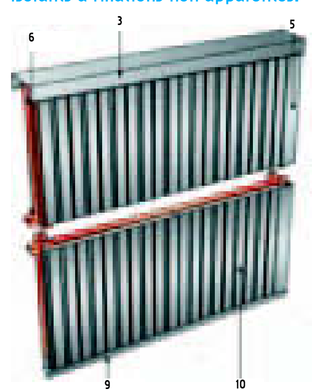
1. Pose des plateaux conformément aux règles professionnelles de bardage
2. Pose de la bavette basse ou larmier
3. Pose de l'isolant
4. Positionnement et fixation de la structure intermédiaire
5. Mise en place du premier profilé
6. Fixation.

Bardage double peau.



1. Contre bardage de retour d'acrotère
2. Pare-vapeur
3. Couronnement d'acrotère
4. Paroi extérieure
5. Angle plié
6. Ossature principale
7. Paroi intérieure
8. Isolant
9. Bavette
10. Panneau sandwich.

Bardage vertical de panneaux isolants à fixations non apparentes.



Bardage de panneaux composites

On peut aussi employer des panneaux sandwich en bardage, en pose verticale ou horizontale. Ils assurent alors une double fonction d'enveloppe et d'isolation.

Mis à part au droit des menuiseries extérieures, on évite généralement la mise en place d'une ossature secondaire, ce qui occasionne un gain de temps sur le chantier et permet l'utilisation de panneaux isolés, prêts à poser et sans ponts thermiques. La pose peut se faire à fixations visibles ou cachées.

Les fabricants réalisent des pièces spéciales de raccordements aux angles, droits ou arrondis, et de raccordement autour des fenêtres ou en couverture. L'insertion des baies s'effectue soit entre les ossatures secondaires de fixation des panneaux de façade, soit par découpage des panneaux et par fixation sur ces derniers par l'intermédiaire de feuillards rigides.

Les points singuliers

L'isolation thermique en partie courante est facile à réaliser. En revanche, au droit de percements tels que baies ou passages de la structure porteuse au travers de la façade, il faut faire attention à ne pas créer de ponts thermiques et acoustiques.

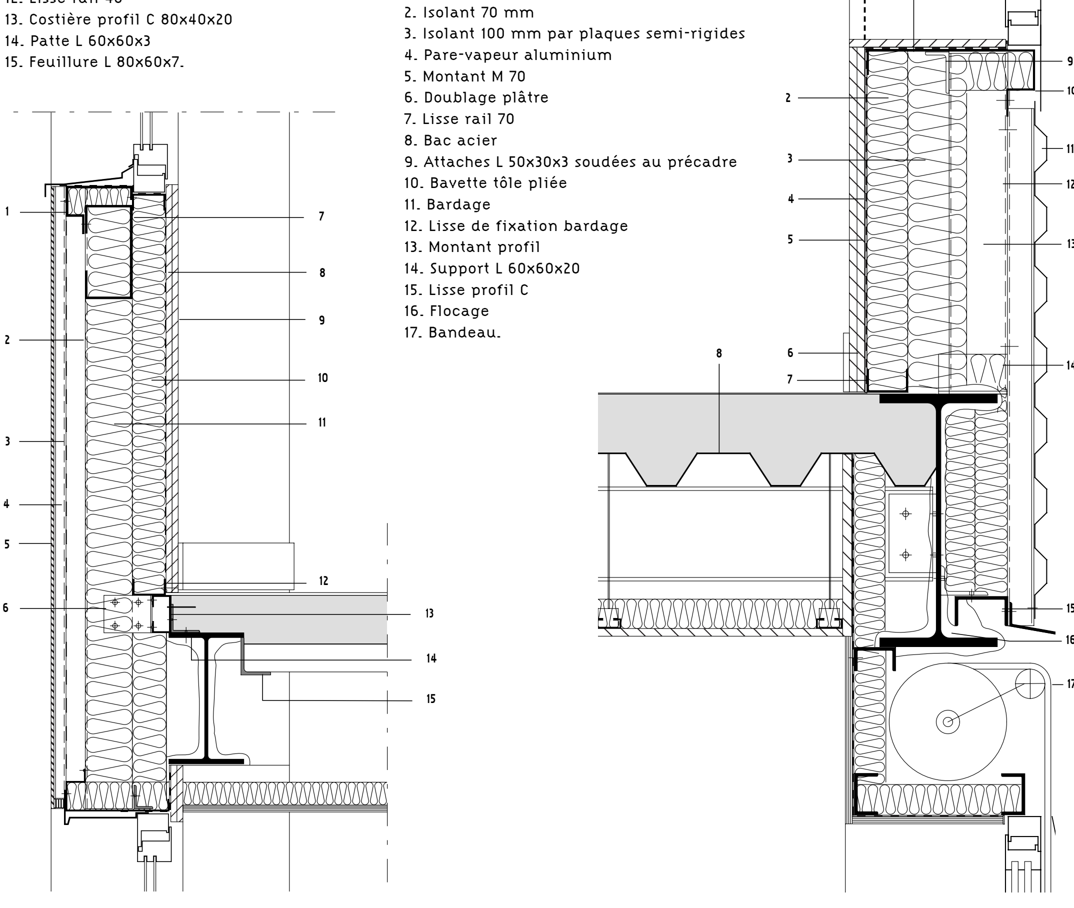
Dans le cas d'une baie incorporée dans une façade légère, la baie peut être placée au nu intérieur de la façade ou au nu extérieur de la façade.

Coupe-type sur une façade de bureaux

1. Cadre tôle pliée 3 mm
2. Pare-pluie
3. Profil] 100 tous les 600 mm
4. Profil omega tous les 450 mm
5. Parement de façade 6 mm
6. Support L 100x30x3
7. Attache L 50x30x3 soudée au précadre
8. Pare-vapeur aluminium
9. Doublage plâtre 2 BA 13
10. Isolant en laine de roche
11. Isolant par plaques semi-rigides 80 mm
12. Lisse rail 48
13. Costière profil C 80x40x20
14. Patte L 60x60x3
15. Feuillure L 80x60x7.

Coupe-type sur une façade de logements

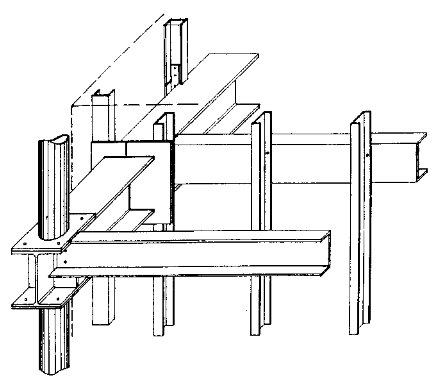
1. Précadre tôle pliée 3 mm
2. Isolant 70 mm
3. Isolant 100 mm par plaques semi-rigides
4. Pare-vapeur aluminium
5. Montant M 70
6. Doublage plâtre
7. Lisse rail 70
8. Bac acier
9. Attaches L 50x30x3 soudées au précadre
10. Bavette tôle pliée
11. Bardage
12. Lisse de fixation bardage
13. Montant profil
14. Support L 60x60x20
15. Lisse profil C
16. Flocage
17. Bandeau.



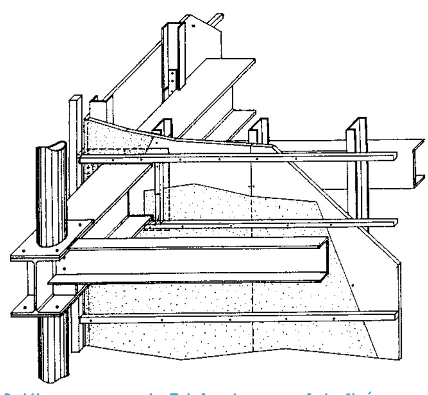
Un autre exemple est celui du passage de la structure au travers de la façade : le passage d'une poutre de plancher au travers d'une façade introduit une faiblesse thermique, la possibilité d'une pénétration d'eau et une discontinuité dans ses matériaux de constitution. Les poutres étant généralement constituées de profilés en I ou en H, il convient de fermer les creux des ailes par soudage en atelier de fourrures, pour reconstituer une surface pleine et étanche dans le plan de l'étanchéité de la façade.

L'isolation thermique s'effectue par interposition d'une membrane ou d'un résilient rupteur de pont thermique au niveau du raccordement de la poutre de plancher avec sa continuité extérieure et par enrobage sur une longueur de 1 à 2 m de la poutre par un isolant à l'intérieur de la façade.

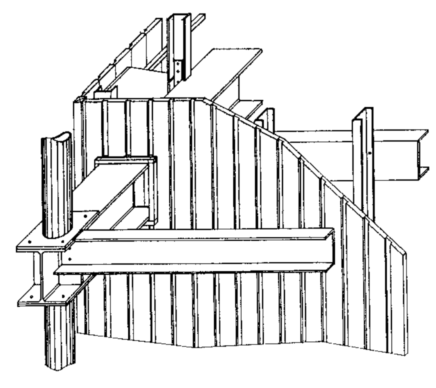
Détail de pénétration d'une poutre dans une façade. École d'Issy-les-Moulineaux. É. Dubosc et M. Landowski architectes.



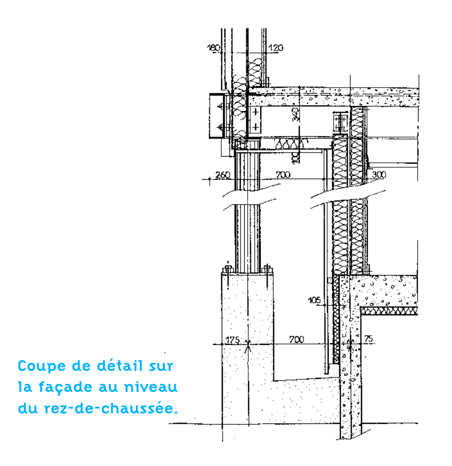
1. Mise en œuvre de la platine soudée en deux parties au droit de la pénétration et de l'ossature de façade.



2. Mise en œuvre du Triply, du pare-pluie fixé par les tasseaux. La laine et les panneaux sont au même nu extérieur.



3. Fixation de la façade et pose du bardage bois.



Coupe de détail sur la façade au niveau du rez-de-chaussée.

7 LES COUVERTURES

La toiture comporte la couverture et son support en charpente métallique, en charpente en bois, voire en béton. De manière analogue aux façades, les couvertures ont des contraintes à résoudre en matière :
– d'étanchéité à l'eau et à l'air ;
– d'isolation thermique et acoustique ;
– de tenue dans le temps ;
– de résistance mécanique (bonne résistance à la flexion, surcharges climatiques), aux chocs (grêle, chute d'objets, d'outils), à l'arrachement (succion).

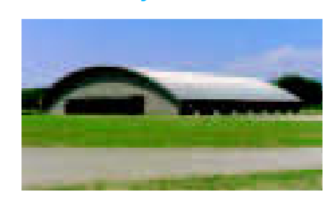
L'acier est très fréquemment utilisé pour les couvertures des bâtiments. Il peut servir de support d'étanchéité aux toitures plates ou à faibles pentes, permettant un net gain de poids par rapport à une dalle en béton armé. Il est également possible de l'utiliser en système de couverture pour les toitures en pente ou cintrées.

L'étude de la typologie des toitures amène à un classement selon plusieurs critères :
– la forme ;
– l'aspect extérieur, la couleur des matériaux, leur état de surface ;
– le type de support ;
– les matériaux employés, leur nature et leurs dimensions ;
– la pente des versants.

On retiendra le dernier paramètre pour ainsi distinguer trois types de couverture :
– les toiture-terrasses à pente nulle ;
– les toiture-terrasse plates : pente de 1 à 3 % ; toiture-terrasses rampantes : pente de 3 à 7 % ;
– les toitures inclinées ou cintrées : pente supérieure à 7 %, appelés « couvertures sèches ».

Pour ce dernier type de couverture, nous distinguerons deux configurations techniques : la toiture froide et la toiture chaude. La pente de la couverture et le traitement de son étanchéité seront traités en fonction :
– de l'architecture du projet ;
– du matériau de couverture retenu ;
– de la région.

Parement métallique à quatre ondes asymétriques en couverture. Salle omnisports de Saint-Maurice-l'Exile, France. F. Devigne architecte.



Les toitures-terrasses à pente nulle

Le plancher de la terrasse doit être réalisé en béton armé ou suivant la technique du plancher collaborant. On dispose dessus une couche bitumineuse d'égalisation des pressions, un pare-vapeur, des plaques d'isolation (laines de haute densité) puis l'étanchéité en couches bitumineuses. L'étanchéité doit être relevée en rives sur des supports en tôle pliée ou sur les parois des murets d'acrotère.

Pour réaliser l'acrotère qui servira à relever le revêtement d'étanchéité, il est possible d'utiliser l'ossature secondaire de façade qui sera prolongée à la hauteur nécessaire. Contre les montants verticaux qui pourront être doublés, il conviendra de fixer une tôle pliée qui reposera sous l'isolant. Une couvertine inclinée vers la terrasse chapeautera l'extrémité supérieure de la paroi du parement de la façade à l'étanchéité. Ce type de toiture peut être utilisé pour des terrasses directement accessibles depuis des locaux habités et pour des toitures végétalisées.

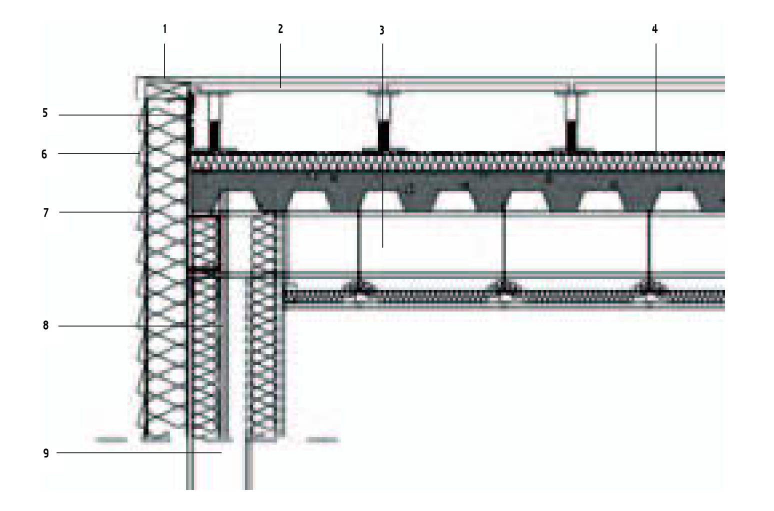
Les pentes nulles et les pentes faibles posent le problème de la rétention d'eau. Il est possible, notamment lorsque des descentes sont bouchées, qu'une accumulation d'eau accidentelle survienne, entraînant une surcharge considérable localisée pour les bacs et la structure. Pour limiter cette surcharge, il est obligatoire de prévoir des trop pleins d'évacuation.



Toiture-terrasse attenante à la chambre d'enfant située à l'étage. Maison métal de la Villette, G. Hamonic et J.-Ch. Masson architectes.



Pose d'une dalle sur plots.



Ci-contre, coupe sur une toiture-terrasse inaccessible

1. Couvertine
2. Protection de l'étanchéité par dalle sur plot
3. Poutre
4. Étanchéité
5. Solin
6. Bardage métallique
7. Ossature secondaire de support de façade
8. Pare-vapeur
9. Poteau.

Les toitures-terrasses plates ou rampantes



Toiture rampante.

Toitures-terrasses plates (pente de 1 à 3 %)

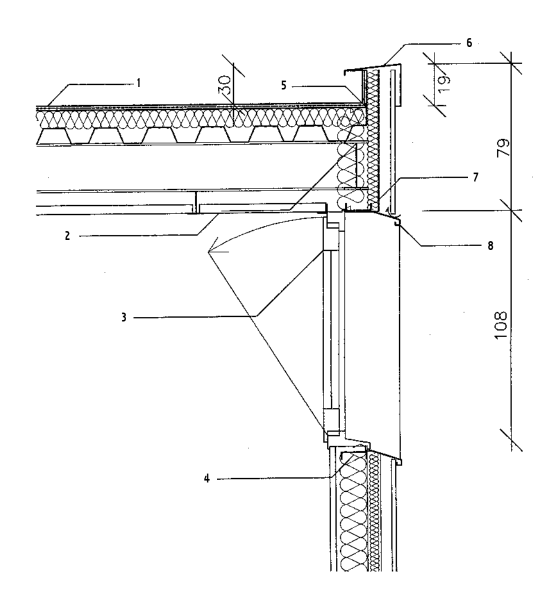
L'étanchéité est également obtenue par l'application de produits bitumineux (étanchéité multicouches) ou de membranes d'étanchéité en PVC sur un isolant. Les bacs nervurés assurent le franchissement des portées entre éléments de structure. Les bacs utilisés sont généralement en tôle d'acier galvanisé. Les fixations des bacs s'effectuent par vis auto-taraudeuses en creux d'onde. Les plaques isolantes rigides sont interposées entre le bac support et l'étanchéité avec éventuellement un pare-vapeur et une protection rapportée.

Ce procédé est léger pour les structures et économique pour les terrasses non accessibles. La mise en œuvre est facile avec des moyens de levage réduits. L'isolation thermique peut être adaptée en fonction des besoins.

L'isolement phonique est fonction des matériaux, de leur épaisseur et de l'ordre de superposition. Par ailleurs, la sous-face apparente de la couverture peut être traitée phoniquement pour absorber ou corriger un niveau sonore important, par exemple par un bac perforé.

Toitures-terrasses rampantes (pente entre 3 et 7 %)

Le système est identique au précédent. Il comporte cependant, suivant les avis techniques, des contraintes particulières de pose des membranes d'étanchéité.

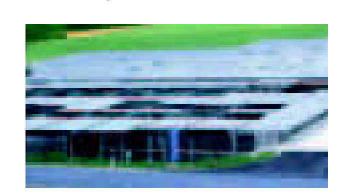


Coupe-type sur une toiture-terrasse plate avec étanchéité posée sur un bac support

1. Étanchéité auto-protégée
2. Faux plafond acoustique
3. Menuiserie avec ouvrant
4. Ossature secondaire de façade
5. Costière acier galvanisé
6. Couvertine en tôle laquée
7. Pare-pluie
8. Précadre.

Les toitures inclinées ou cintrées

L'étanchéité est simplement assurée par le recouvrement des bacs ou des feuilles métalliques, plus ou moins important suivant l'inclinaison de la couverture et le produit. Les produits mis en œuvre bénéficient d'avis techniques définissant les méthodes et les recommandations de pose.



Vue sur la toiture en pente, en tôle d'inox brut, de l'usine de microtechniques à Gals, Suisse. J.-L. Crochon + Cuno Brullmann associés architectes.

Les couvertures sèches peuvent être utilisées dans des conditions spécifiques de mise en œuvre avec des produits adaptés pour des pentes inférieures à 7 %, mais toujours supérieures à 5 %.

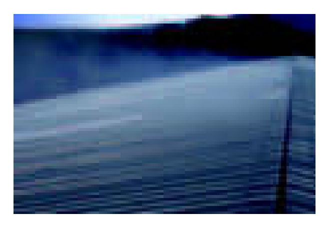
Dans ce type de couverture, on distingue deux cas de mise en place de l'isolation : les toitures froides et les toitures chaudes.

Toitures froides

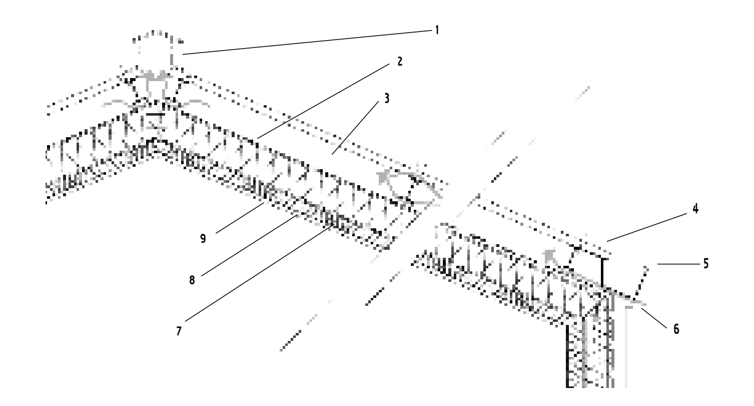
Ce principe de toiture repose sur la ventilation de l'interface entre le bac de couverture et l'isolant thermique par une convection naturelle. Il convient d'aménager des prises d'air en partie basse de la couverture et des évacuations de celui-ci en partie haute de la couverture. Les creux d'onde ne suffisant pas, il convient de poser des écarteurs ou des calages entre les pannes et le bac pour dégager un espace suffisant permettant à l'air de circuler. Ce type de couverture comprend en général pour des locaux habités les éléments suivants (de l'extérieur vers l'intérieur) : le bac acier, le vide d'air ventilé, l'isolant thermique, le pare-vapeur, la ou les plaques de plâtre de finition.



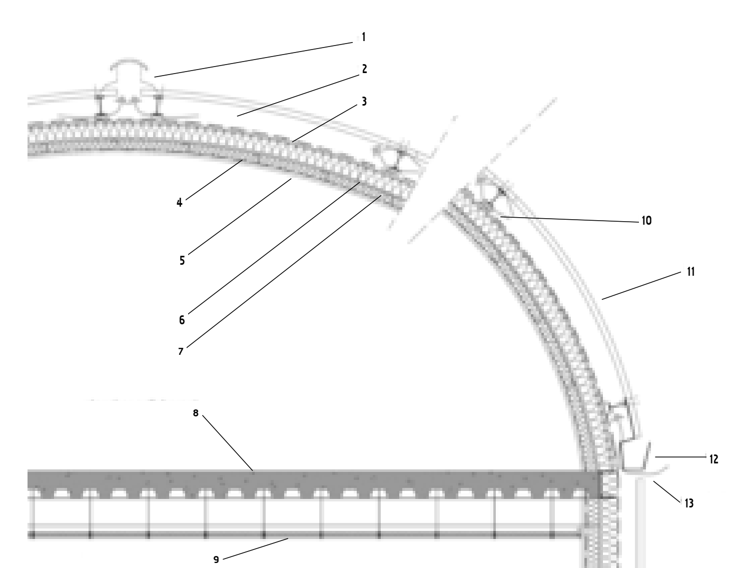
Toiture à deux pentes, bâtiment agricole.



Ce système est relativement aisé à mettre en œuvre quand les rampants des couvertures sont plans. Ceci permet en plus de rendre les combles habitables. Sinon, l'isolant est mis au niveau du dernier plancher.



Ci-contre, coupe schématique d'une toiture froide avec vide d'air ventilé.
1. Exutoire
2. Film Pare-pluie
3. Vide d'air ventilé
4. Bac acier
5. Chêneau
6. Entrée basse
7. Laine minérale
8. Film pare-vapeur
9. Plaque de plâtre.



Ci-contre : coupe schématique sur une toiture froide cintrée

1. Exutoire
2. Vide d'air ventilé
3. Film pare-pluie
4. Film pare-vapeur
5. Plaques de plâtre cintrées
6. Arbalétrier cintré
7. Laine minérale
8. Plancher collaborant
9. Faux plafond acoustique
10. Écarteur ponctuel
11. Bac acier
12. Chêneau
13. Entrée Basse.



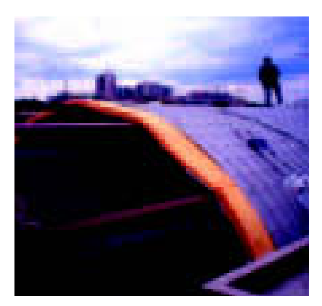
Toiture cintrée en inox. Maison des jeunes et de la culture de Bollwiller, France. Jaegie architecte.

En revanche, quand la couverture est courbe ou architecturalement complexe, l'évacuation au faîte peut être techniquement délicate et d'un aspect esthétique médiocre.

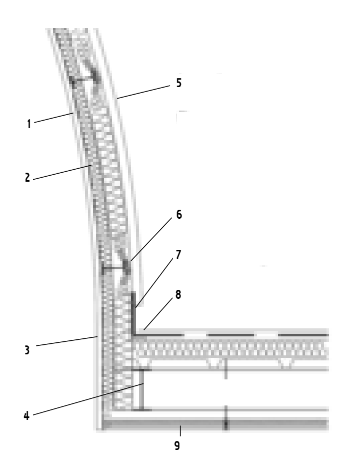
Toitures chaudes

La toiture chaude permet d'éviter le vide d'air ventilé par plaquage de la laine isolante contre le bac acier de couverture. Ce procédé est beaucoup plus simple à mettre en œuvre mais peut être moins performant en confort d'été. Le dimensionnement de l'isolant devra être étudié précisément dans ce cas de figure. C'est le cas des panneaux sandwichs et des bacs acier double peau. Les matériaux utilisés pour le complexe de couverture chaude sont identiques à ceux utilisés pour les toitures froides.

La pose du pare-vapeur sera totale et à recouvrement extrêmement soigné sur la totalité de la surface de la couverture jusqu'aux joints des précadres ou des dormants des ouvertures s'il en existe. L'isolation acoustique en cas de pluie est particulièrement performante.



Pose d'une toiture chaude cintrée.



Ci-contre : coupe schématique d'une toiture chaude.

1- Plaque de plâtre cintrées
2- Film pare-vapeur
3- Jouée en plaque de plâtre
4- IPE 220
5- Bac acier
6- Feutre isolant entre les pannes et le bac
7- Costière en acier galvanisé
8- Étanchéité auto protégée
9- Faux plafond acoustique.

Les typologies de couverture

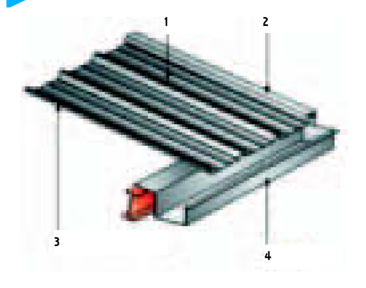
Couvertures par plaques

Elles se composent d'éléments à nervures ou à ondes, ce qui leur confère une certaine raideur à la flexion. Les plaques peuvent être en tôle d'acier galvanisé, prélaqué ou non, ou en inox. Il s'agit la plupart du temps de plaques nervurées planes, mais le cintrage, y compris le cintrage par crantage, se fait aussi. Ce type de couverture permet de couvrir des versants de 40 m de longueur voire plus, en particulier dans le secteur industriel, commercial, scolaire et agricole.

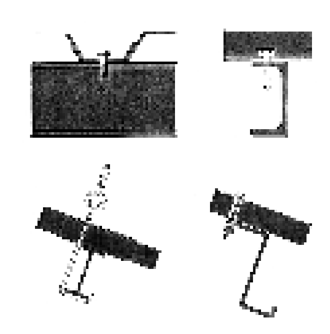
Les éléments portent directement sur les pannes dont l'espacement est fonction des caractéristiques des plaques et des conditions climatiques. En principe, on pose les plaques avec la nervure dans le sens de la plus grande pente, depuis la panne sablière jusqu'à la panne faîtière.

Par ailleurs, on recouvre longitudinalement les plaques, en emboîtant les nervures entre elles dans le sens opposé aux vents dominants. Le recouvrement transversal se fait au droit d'un appui.

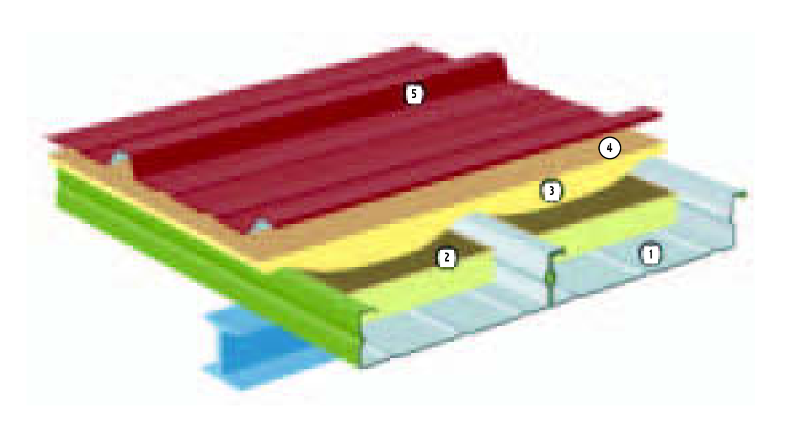
Les plaques sont fixées pour résister à l'arrachement et empêcher leur glissement. La fixation se fait en haut des ondes ou nervures ou en plage. Elle est assurée par des boulons à crochets, des boulons ou des vis autoperceuses, en fonction de la structure porteuse. En plus des parties courantes, des points particuliers, notamment les faîtières, les closoirs fermant les ondes, les chéneaux, etc. sont réalisés avec des éléments en acier galvanisé prélaqué.



Couverture à simple peau en profils nervurés
1. Paroi extérieure
2. Bande de rive
3. Régulateur hygrothermique en sous-face (éventuellement)
4. Chéneau.



Exemples de fixations de couvertures en bacs nervurés.



Ci-contre, couverture à double peau avec sous-face lisse pleine, fixations cachées et isolation intégrée ; ce type de couverture permet aussi une bonne isolation acoustique
1. Plateau de support
2. Laine minérale forte masse volumique
3. Isolant laine minérale
4. Pare-vapeur
5. Profilé trapézoïdal.

Il est possible aussi de fixer une sur-toiture au-dessus du bac. L'intérêt est double : atténuer le choc thermique sur la couverture, enrichir architecturalement la couverture par des effets de double peau et de transparence. Les matériaux peuvent être des tôles lisses épaisses, des bacs métalliques perforés en acier, en inox ou en aluminium, des lisses en métal ou en bois…



Panneau sandwich de couverture à sous-face perforée.

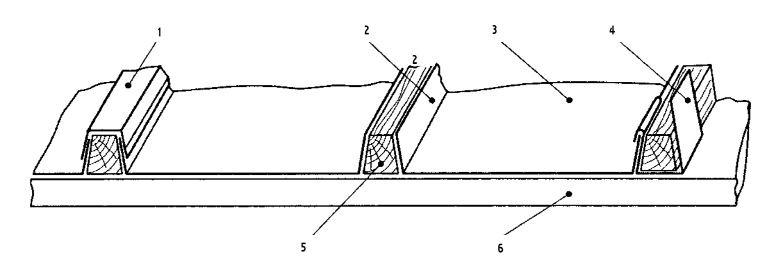
Couvertures par panneaux composites

Enfin, les panneaux composites que nous avons décrits en façade peuvent aussi être utilisés pour réaliser des couvertures sèches. Ils ont l'avantage d'intégrer l'isolant thermique et d'offrir une sous-face finie. Les panneaux composites dont la face intérieure est perforée offrent une bonne absorption acoustique. L'épaisseur des panneaux varie de 30 à 100 mm ; ils peuvent avoir une longueur maximale de 15 m environ, suivant les contraintes de transport et de pose. L'étanchéité est assurée par recouvrement du panneau inférieur par le débord du parement du panneau supérieur. La fixation s'effectue en haut de nervure.

Couvertures par longues feuilles métalliques

Ce type de matériau de couverture est adapté à toutes les formes de toiture, que ce soit des surfaces planes, cintrées ou gauches. On l'utilise surtout dans le secteur du résidentiel, des activités tertiaires et scolaires. Le matériau utilisé dépend entre autres des conditions atmosphériques dans lesquelles se trouve le bâtiment : alors que l'inox sert dans des atmosphères urbaines et industrielles polluées, l'acier galvanisé et prélaqué suffit pour les atmosphères normales, rurales ou urbaines industrielles ou marines. L'un des avantages de ce système est de pouvoir couvrir les rampants avec une feuille continue de grande longueur et donc de limiter les joints et par conséquent les risques de fuite.
Il existe différents systèmes de pose qui nécessitent tous un calepinage pour la combinaison des joints quelle que soit la forme de la toiture :

– les couvertures à tasseaux et couvre-joints. Les feuilles sont façonnées contre des tasseaux en bois et sont de cette manière reliées entre elles. Les tasseaux



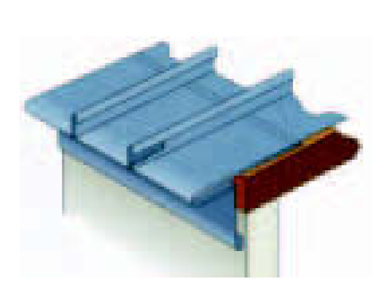
Ci-contre, schéma de principe de couverture à tasseaux
1. Couvre-joint
2. Relevé
3. Plage de feuille
4. Patte à tasseaux
5. Tasseau
6. Support.

sont fixés au voligeage à l'aide de clous. La jonction transversale n'existe pas si la feuille est aussi longue que le rampant. Sinon elle peut être à simple agrafure, double agrafure, ou à ressauts (les joints longitudinaux seront alors disposés en quinconce) ;

– les couvertures à joints debouts. L'entraxe entre joints étant fonction de la largeur de la feuille, celle-ci est façonnée avec la feuille adjacente contre des pattes de fixation ancrées dans le voligeage qui sont rabattues dans le pli et maintiennent la couverture. La jonction longitudinale est moins marquée dans ce cas de figure. La jonction transversale est quant à elle traitée de la même manière que pour la pose à tasseaux, si ce n'est qu'il est généralement prévu un décalage dans la position des joints transversaux.



Couverture en inox à joints debouts. Pentapole du Pic-du-Midi à Lannemezan, France. SARL 3608 architectes.



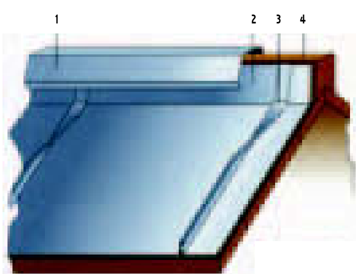
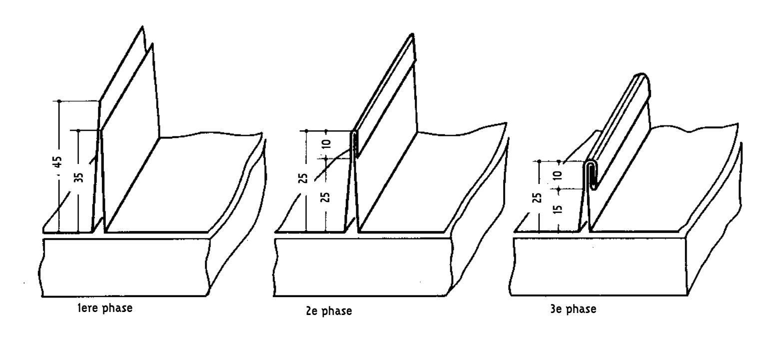


Schéma de principe de la couverture à joints debout (ci-contre) : partie courante et raccord au faîtage
1. Couvre-joint de faîtage
2. Relevé
3. Joint couché
4. Tasseau de faîtage.

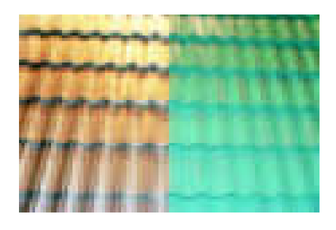


Ci-contre, mise en œuvre d'un joint debout par sertissage.

Couvertures par tuiles métalliques

Il existe aussi des tuiles en acier prélaqué qui se présentent sous forme de panneaux en tôle emboutie galvanisée et prélaquée regroupant plusieurs tuiles. Les panneaux peuvent ainsi couvrir d'un seul jet des longueurs jusqu'à 6 m, pour une largeur de 1 m. De larges gammes de formes et de couleurs sont disponibles, y compris des revêtements granités, texturés ou à très faible brillance, pour imiter si besoin des matériaux traditionnels. Ce type de couverture est à la fois facile à poser et très résistant aux intempéries.

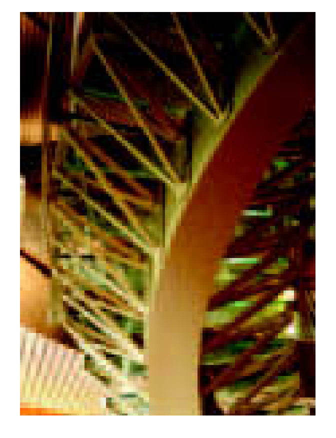
Couverture en tuile d'acier.



8 LES AMÉNAGEMENTS INTÉRIEURS ET LA SERRURERIE

De nombreux produits en acier (plats, tubes, barres, tiges, câbles, cornières…) sont utilisés pour les aménagements intérieurs et dans les éléments annexes de serrurerie qui appartiennent au second œuvre du bâtiment car ils ne font pas partie de sa structure porteuse ni de son enveloppe étanche.

On trouve ainsi des parties en acier dans les aménagements intérieurs tels que les revêtements de sol et faux planchers, les cloisonnements, les faux plafonds ou les habillages. Les bureaux modernes ou certains locaux spécialisés nécessitent des faux planchers sur vérins pour permettre la circulation de câbles informatiques ou de gaines de ventilation. Les dalles peuvent être épaisses à double paroi ou en simple tôle épaisse striée, larmée ou perforée.



Structure en acier d'un escalier aux marches en verre. Hôtel de ville de Gauchy. É. Dubosc et M. Landowski architectes.

Les éléments de serrurerie sont quant à eux majoritairement en acier ou en inox, que ce soient les escaliers, les garde-corps, les auvents, les protections des façades, les ouvertures et portes vitrées, tôlées ou pleines, les grilles verticales et horizontales, les structures tendues ou suspendues décoratives, les équipements d'éclairage.

En revêtement et en habillage, toutes les formes et finition d'acier – plane ou nervurée, perforée ou non, galvanisée ou prélaquée – peuvent être réalisées. Les inox font partie des aciers les plus utilisés en revêtement décoratif intérieur. Les nombreux traitements de surface allant d'un aspect poli ou satiné jusqu'au gaufré, confèrent à ce matériau des possibilités d'utilisation très diverses. La très large gamme des mailles tissées ou tressées élargit encore la palette.

Les cloisonnements

On distingue les cloisonnements intérieurs simples entre locaux et les cloisonnements entre locaux et circulations. L'acier est principalement utilisé pour les éléments d'ossature ce qui permet de mettre en œuvre une grande variété de panneaux de remplissage et de finition.

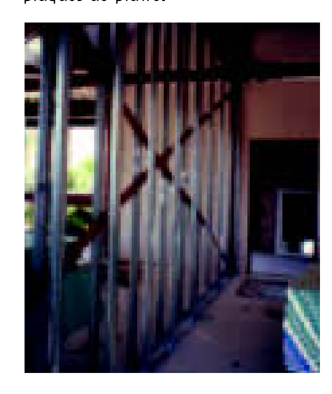
Contrairement à l'idée reçue selon laquelle seule la loi de masse assure un confort acoustique, il est aisé d'obtenir une très bonne isolation acoustique avec des cloisons comportant par exemple une vêture en acier. Les systèmes de partition constitués de deux parois séparées par un vide d'air bénéficient en effet de l'effet acoustique masse-ressort-masse qui rend la paroi double avec ossature acier beaucoup plus efficace qu'une paroi simple d'épaisseur équivalente. La présence entre les deux parements d'un absorbant acoustique comme la laine minérale, en plus d'un vide d'air, améliore encore la performance.
Les nouveaux systèmes composites à parements multiples combinent quant à eux ossature métallique légère, plaques de plâtre et laine de verre, mais aussi panneaux de bois, de fibres et résilients divers. L'absorption acoustique est assurée sans surcharge de poids. Ceci nécessite toutefois une qualité de pose soignée afin de réduire au maximum les fuites d'air ou les ponts thermiques au droit des interfaces. Ces systèmes asurent également une excellente résistance au feu.

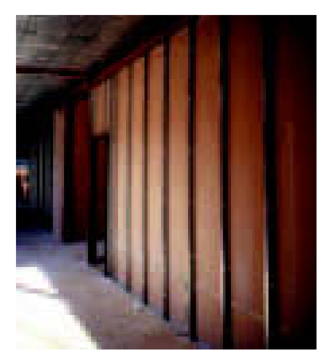
Cloisonnement simple entre locaux

Les locaux concernés peuvent être des logements, des locaux tertiaires ou d'activités, des chambres d'hôpital ou d'hôtel... L'ossature verticale de la cloison est constituée de profilés tubulaires ou ouverts de section en C, en U ou en Z réalisés en tôle profilée galvanisée, appelés « profils à froid ». Cette ossature verticale est fixée à intervalles réguliers dans des traverses hautes et basses en profils à froid posées au sol et au plafond.

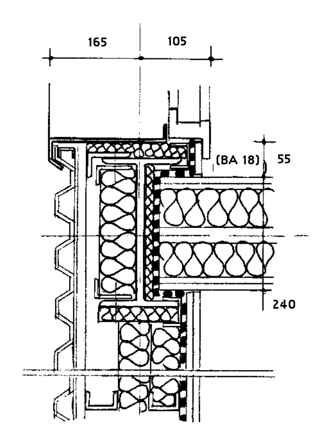
Le parement le plus couramment utilisé est la plaque de plâtre vissée sur les montants verticaux et les rails horizontaux haut et bas. La cloison peut être creuse ou remplie de laine minérale et comporter une, deux ou trois plaques de plâtre sur chacune de ses faces, pour réaliser l'affaiblissement acoustique recherché. On peut ainsi obtenir d'excellentes performances. C'est la solution retenue pour isoler par exemple des studios d'enregistrement ou des salles de cinéma. L'épaisseur de la cloison séparative varie en fonction des isolements acoustiques recherchés, de sa hauteur et des parements utilisés. L'entraxe usuel des montants verticaux est de 0,60 m, car les largeurs respectives des lés de laine de remplissage et des plaques de plâtre sont de 0,60 m et de 1,20 m. Dans les logements, la cloison s'arrête au faux plafond sauf au droit des séparatifs. Dans les locaux tertiaires, la cloison peut aller jusqu'à la sous-face du plancher pour assurer le compartimentage du plenum.

Étapes de réalisation d'une cloison sur ossature de profils à froid
1- Pose de l'ossature métallique
2- Pose des plaques de plâtre
3- Finition des joints entre les plaques de plâtre.

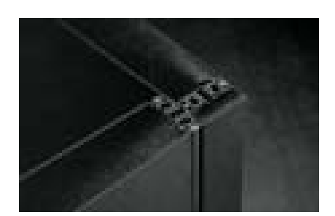








Vue en plan de l'intersection d'un mur de façade et d'une cloison séparative comportant deux doubles épaisseurs de plaques de plâtre de 18 mm.



Détail de fixation à l'angle de deux cloisons monobloc.

Les plaques de plâtre peuvent être remplacées par des panneaux de bois de particules ou par des vitrages avec des profils à froid comme structure.

Dans les locaux tertiaires, d'activités et de cuisine collective par exemple, le parement de finition peut être métallique pour assurer une plus grande résistance ou une plus grande longévité. La cloison peut alors être conçue comme un monobloc dont les parements sont en acier galvanisé et laqué industriellement. L'inox est également utilisé. Les tôles de parement peuvent subir des mises en forme très diverses par pliage ou par cintrage. L'âme de la cloison est constituée dans ce cas de mousse de polyuréthane ou de laine injectée pour assurer son isolation phonique, son isolation thermique éventuellement et sa planéité.

Cloisonnements entre locaux et circulation

La constitution de la cloison est identique, avec un renforcement de l'isolation acoustique. La cloison est obligatoirement fixée en sous-face du plancher supérieur.

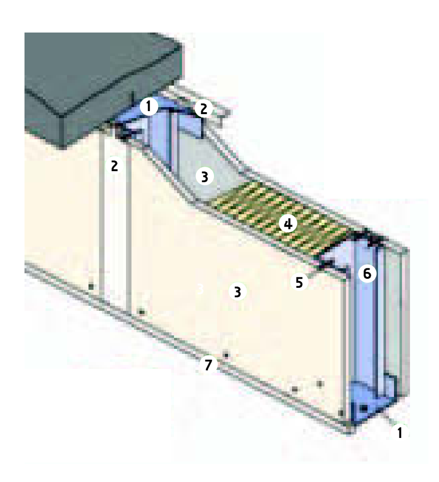
Cloisonnement intérieur

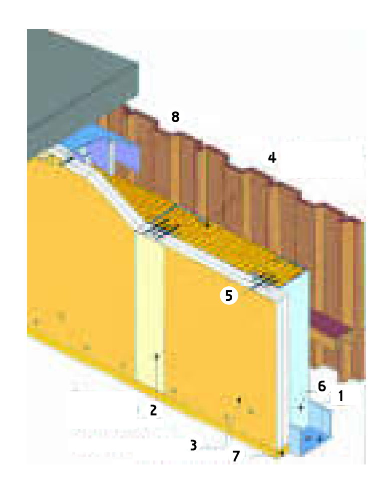
1. Rail
2. Traitement de joint bande et enduit
3. Plaque de plâtre
4. Matériau isolant ou absorbant
5. Vis
6. Montant en acier
7. Joint d'étanchéité à l'air.

Doublage de façade

1. Rail
2. Traitement de joint bande et enduit
3. Plaque de plâtre
4. Matériau isolant ou absorbant
5. Vis
6. Montant en acier
7. Joint d'étanchéité à l'air
8. Bardage.

Ci-contre : détails de jonction d'éléments de cloison sur ossature acier, cloisonnement intérieur et doublage de façade.

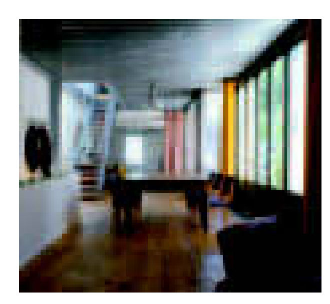




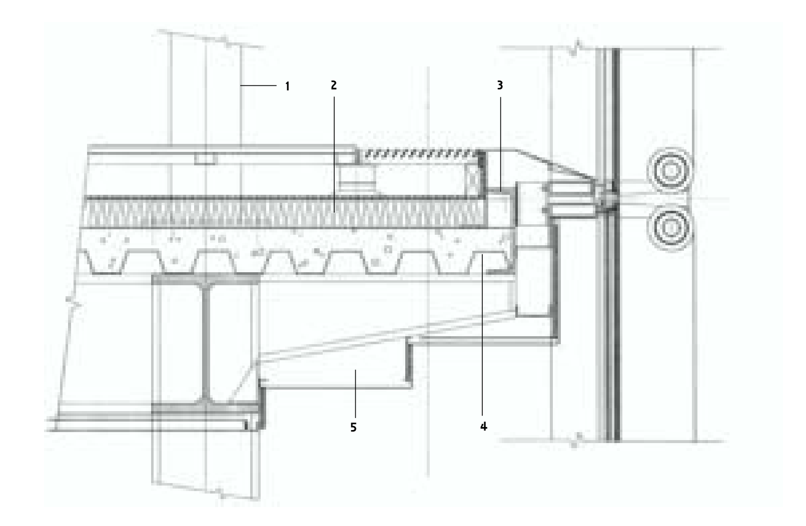
Les plafonds

Des faux plafonds métalliques peuvent être constitués :
– de tôles planes pliées sous forme de bacs ou de cassettes pour leur tenue mécanique et leur planéité ;
– de tôles perforées ou profilées ;
– de treillis ;
– de caillebotis ;
– de mailles tissées.

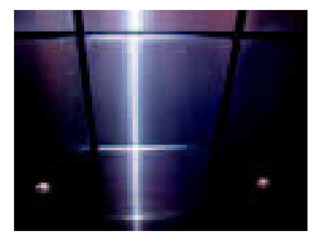
Ils sont en général fixés à une ossature secondaire suspendue au plancher supérieur, ou autoportants de cloison à cloison. Le choix s'effectue en fonction des contraintes techniques : feu, acoustique, humidité, exigence sanitaire… et de l'aspect intérieur recherché. Des associations de matériaux sont également possibles.



Bacs en acier galvanisé apparent en plafond. Maison-atelier à Montrouge. Frédéric Jung architecte.

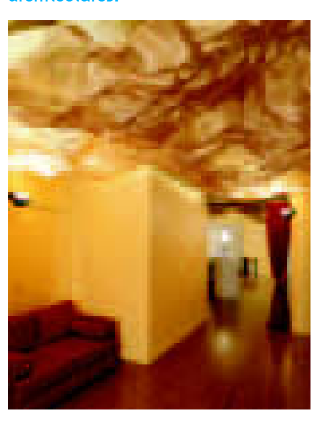


Coupe sur l'acrotère de la terrasse de la Fondation Cartier à Paris, Jean Nouvel et Emmanuel Cattani architectes
1. Poteau rectangulaire 200 x 150 mm
2. Isolation
3. Profil UPN 240 de rive
4. Bac collaborant
5. Faux plafond.



Cassettes de faux-plafond.

Faux plafond en micro maille d'acier inoxydable. Agence de vidéo-production Nelson-Babylone à Boulogne-Billancourt. Palissad architectures.



La serrurerie

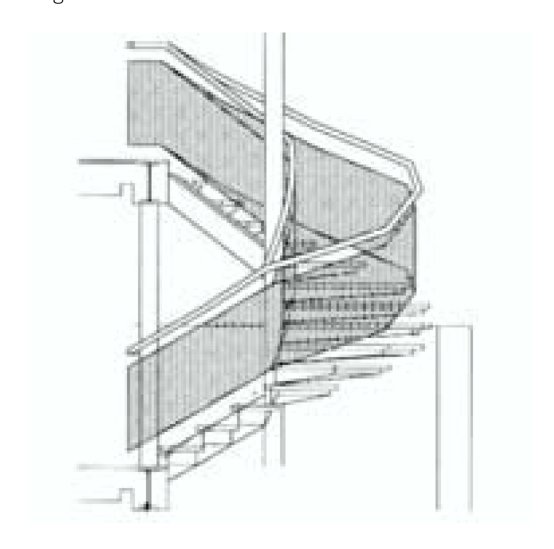


Escalier en tôle pliée laquée conçu par V. Amantea et B. Dupuis.

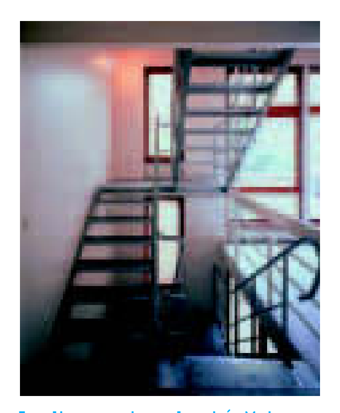
Les éléments de serrurerie peuvent être fabriqués industriellement mais sont en général réalisés sur mesure en atelier. Dans ce cas ils sont de faibles sections pour pouvoir être façonnés aisément avec des machines de dimensions modestes. La liberté de pouvoir donner de multiples formes à ces éléments offre aux concepteurs un champ créatif immense.

Les escaliers

Les escaliers peuvent être droits ou hélicoïdaux. Le champ de création est presque infini, à l'intérieur des règles classiques de dimensionnement des marches et du giron.



Dessin d'un escalier hélicoïdal avec des marches caillebotis en acier galvanisé, une main courante en tube d'acier et un garde-corps en tôle perforée. P. Chavannes architecte.



Escalier en acier galvanisé. Maison dans le 19e arrondissement de Paris. Georges Maurios architecte.

Les garde-corps

L'acier peut être utilisé dans différentes parties d'un garde-corps :
– la main courante ;
– les montants, qui peuvent être constitués :
  – d'un plat épais soudé sur une platine,
  – de deux plats moisés,
  – de tubes ronds ou carrés ;
– l'appui précaire ou remplissage du garde-corps, qui peut être constitué d'une tôle d'acier perforée ou pleine ou de métal déployé ;
– les lisses intermédiaires de protection qui peuvent être constituées de carrés ou de ronds pleins, de tiges ou de câbles tendus en inox.

Garde-corps en acier inoxydable.

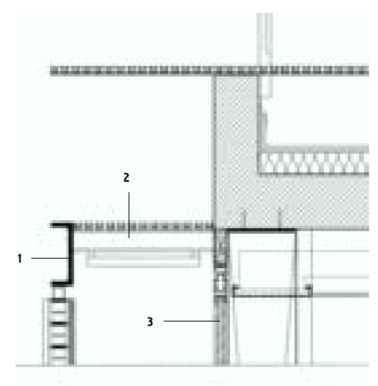


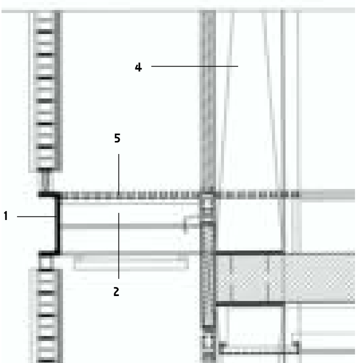
Les brise-soleil

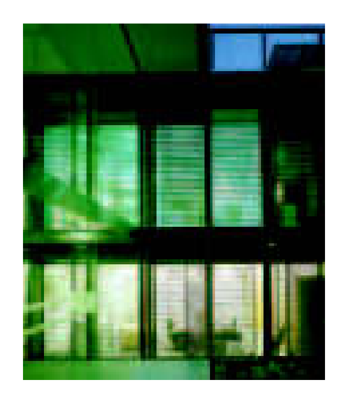
Devant les façades très exposées au sud et à l'ouest, il est possible de doubler la façade par des tôles perforées ou par un système de lisses ou tout autre dispositif qui permet de tamiser l'impact des rayons solaires et améliorer le confort d'été. Ce dispositif mis en place devant une façade pleine ou vitrée peut être retourné ou prolongé en couverture.

Les brise-soleil peuvent être fixes ou mobiles. Pour être efficaces, ils doivent être étudiés en fonction des courbes d'ensoleillement.

Outre le rôle d'occultation et de brise-soleil, les protections de façade ajoutent de la profondeur esthétique et renforcent la sécurité contre l'intrusion.







Brise-soleil en façade. Immeuble de bureaux réhabilité Paris 8e par l'agence Naux et Poux architectes.

Ci-contre, coupe verticale sur la façade
1. Poutre UAP 220
2. Poutre HEA 100
3. Chassis coulissant aluminum
4. PRS de structure
5. Plancher caillebotis profil rainuré.

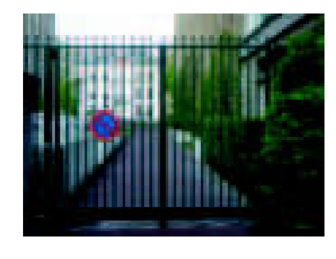


Pose de la toiture brise-soleil sur la péninsule du Hall 2F à l'aéroport de Roissy, France. P. Andreu/ADP architectes.

Les ouvertures et les grilles

Le serrurier réalise des ouvrages particuliers que n'exécutent pas les fabricants ou les industriels ensembliers de grandes séries de produits. Ainsi, un certain nombre de portes situées dans des façades ou donnant accès à des locaux à risques spéciaux, feu, dégradations,… peut être fabriqué par le métallier. À noter qu'il existe aujourd'hui différentes gammes de porte coupe-feu ou pour halls d'immeuble à ossature en acier, y compris inoxydable, cohérentes avec des vitrages pare-flamme.
De même les grilles de façade pour aménager des prises d'air ou des rejets, les grilles de clôture ou les portails existent en standard ou peuvent être fabriqués sur mesure par un serrurier.

Grille d'immeuble.



9 LA PROTECTION CONTRE LA CORROSION

Lorsqu'il est soumis à des atmosphères humides, à des agressions chimiques, à la condensation, qu'il est en contact avec l'eau ou les sols, l'acier, comme tous les métaux, tend à s'oxyder et à se corroder. C'est un phénomène électrochimique qui entraîne la formation d'oxyde (rouille). Dans le cas de l'acier ordinaire non protégé, la rouille est une matière pulvérulente, sans résistance mécanique et poreuse, ce qui permet la progression du phénomène à l'intérieur de la pièce et sa dégradation progressive.

Par rapport au nickel, au plomb, au cuivre et à l'argent, le fer et l'acier se comportent comme des anodes. Le contact avec ces métaux entraîne la corrosion de l'acier. Par rapport au chrome, au zinc ou à l'aluminium, au cadmium ou à l'étain, le fer et l'acier se comportent comme des cathodes. Ainsi, le contact électrolytique entre des pièces d'acier et l'aluminium, en présence d'eau impure (électrolyte) provoque la corrosion de l'aluminium. On emploie couramment des revêtements de zinc ou d'aluminium pour protéger l'acier car ils forment alors une couche d'oxyde imperméable. Cette protection est surfacique. Il faut donc surveiller les parties découpées ou percées qui ne sont plus protégées par la galvanisation ou l'aluminiage. Pour les faibles épaisseurs (inférieures au 2 mm) la protection se reconstitue naturellement dans le cas de la galvanisation. Le chrome est quant à lui essentiellement employé sous forme d'alliage avec l'acier (acier inoxydable) et rarement sous forme de protection surfacique (mobilier, visserie, robinetterie,…).

En fonction du degré d'agressivité auquel est soumis l'ouvrage, de la durée de protection envisagée, des possibilités de mise en œuvre et d'entretien, et du coût, l'acier recevra une protection plus ou moins poussée selon ses fonctions dans la construction :
– enveloppe : l'acier devra résister aux agressions extérieures (environnement) et éventuellement intérieures (condensation) ;
– éléments porteurs : généralement peu exposés s'ils sont à l'intérieur des ouvrages, ils ne nécessitent pas de protections importantes. À l'extérieur, il faut en revanche assurer leur pérennité ;
– esthétique : pour les éléments visibles, même si la corrosion n'est pas redoutée, il peut parfois être nécessaire d'appliquer des revêtements pour des raisons esthétiques et d'aspect.

Les pièces métalliques exposées (extérieures) doivent être étudiées pour éviter les rétentions d'eau, particulièrement aux liaisons poteaux/poutres et aux scellements sur des parois verticales ou sur des socles d'assise. Les pénétrations de structure dans la maçonnerie ou le béton sont particulièrement vulnérables et doivent être protégées avec soin. Les eaux de ruissellement, de lavage ou de condensation peuvent séjourner aux points de pénétration et attaquer les sections métalliques. Dans ce cas de figure, il convient d'éviter de faire transiter les efforts principaux par ces structures.

Bardage à ondes horizontales en acier prélaqué. Atelier-relais à Chanteloup-les-Vignes. C. Lauvergeat et P. Cremonini architectes.

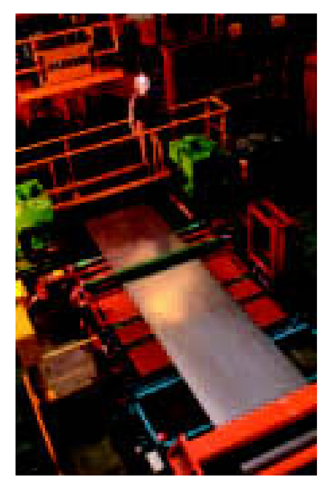


Les revêtements métalliques

Quelle que soit la manière dont on forme le revêtement de zinc ou d'aluminium sur la surface d'acier, son pouvoir protecteur contre la corrosion s'exerce avec la même efficacité ; il est avant tout fonction de l'épaisseur de métal déposée.

La galvanisation ou l'aluminiage au trempé

Les objets sont immergés dans un bain de zinc ou d'aluminium en fusion et sont recouverts d'une masse de métal protecteur dont la valeur peut varier de 350 à 1000 g/m^2 (50 à 140 µm d'épaisseur). Les objets ainsi protégés sont variés, depuis ceux formés d'une seule pièce (la boulonnerie, les ferrures…) jusqu'à ceux formés par assemblage (éléments de charpente métallique, pylônes…), en passant par les profils creux (tubes), les fils d'acier et les articles ménagers.

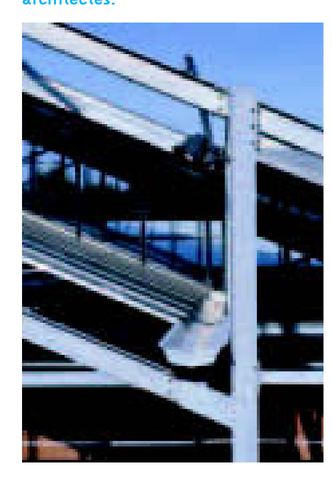


Ligne de galvanisation de tôle mince en continu.

La galvanisation ou l'aluminiage en continu

Les produits sidérurgiques recouverts sont essentiellement les tôles minces et moyennes. Elles sont livrées à l'état de bobines ou de feuilles. La tôle d'acier galvanisée est utilisée en particulier pour les éléments de couverture, de bardage ou de façade, de plancher, les conduits d'aération ou de ventilation. On peut également trouver sur le marché des éléments d'ossature légère en tôle d'acier galvanisée, des menuiseries, des cornières et autres profilés ainsi que des tubes et des fils. La masse nominale de zinc peut varier de 100 à 725 g/m^2 double face (7 à 42 µm sur chaque face). L'évolution des processus de fabrication de la galvanisation en continu fait qu'il n'y a aujourd'hui quasiment plus de fleurage sur les tôles zinguées.
La couche d'aluminium protège bien l'acier contre l'action des atmosphères humides et en particulier de celles qui sont acides (atmosphères industrielles). Elle résiste bien aux températures élevées (cheminées). Elle peut être peinte, moyennant certaines précautions de préparation de surface. On emploie aussi des alliages zinc-aluminium (aluzinc) moins chers et très efficaces.

Structure en acier galvanisé de la cuisine-relais et restaurant à Artigues-près-Bordeaux, France. P. Hernandez et P. Tavernier architectes.



La métallisation au pistolet

Cette technique consiste à projeter sur les surfaces d'acier, préalablement préparées, du zinc ou de l'aluminum en fusion au moyen d'un pistolet métalliseur. Comme pour le zinc, l'aluminium ainsi projeté peut être colmaté et peint.

Le zingage électrolytique (électrozinguage)

Les revêtements électrolytiques sont appliqués soit sur des pièces d'acier de dimensions réduites (serrurerie, visserie, par exemple) compatibles avec celles des cuves d'électrolyse, soit sur des feuilles ou des bobines d'acier, en usines sidérurgiques. Les épaisseurs de zinc déposées sont plus faibles que par trempage à chaud. Les pièces ainsi protégées conviennent pour l'intérieur.

Les peintures

Le rôle de la peinture

Les peintures n'ont pas qu'un rôle de décoration. Elles jouent aussi un rôle de revêtement protecteur. Cette protection est assurée soit par l'isolation de l'acier par rapport au milieu corrosif (de l'humidité et de l'oxygène), soit par une réaction électrochimique déclenchée par les pigments ou leurs produits de réaction avec l'acier.

Les premières couches (« primaires ») ont en effet un pouvoir inhibiteur. Les peintures antirouille usuelles sont le minium de plomb, le chromate de zinc, la poudre de zinc. L'oxyde rouge ferrifère (dit improprement « minium de fer ») et la poudre d'aluminium sont aussi employés en primaires, bien que sans pouvoir antirouille spécifique. Dans le cas des tôles minces, la peinture doit être appliquée sur une base déjà galvanisée. Lorsque l'application se fait en usine en continu, on parle de « prélaquage ». La peinture joue alors un rôle protecteur pour la galvanisation qui elle-même protège l'acier.

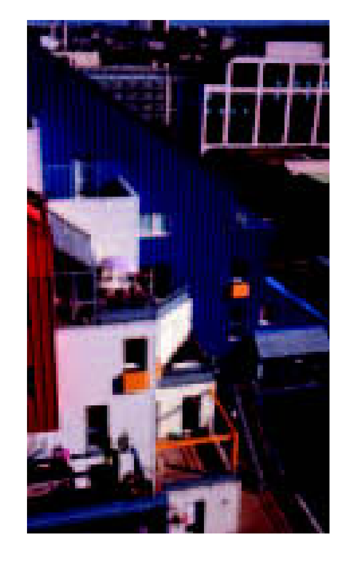
La préparation des surfaces avant peinture a une importance capitale. En effet, les supports en acier doivent être « décapés » au préalable par sablage ou grenaillage. Il existe quatre types de sablage : léger (SA1), soigné (SA2), très soigné (SA2.5), à blanc (SA3). Le sablage n'est autorisé à l'air libre que selon certaines précautions ; le grenaillage n'est possible économiquement qu'en atelier (récupération des grenailles). On applique quelquefois avant la peinture des produits de « passivation » améliorant la protection. La calamine qui peut subsister en plaques sous la peinture rend celle-ci inefficace. Une méthode économique et efficace consiste à laisser les ossatures brutes exposées aux intempéries (soit au stockage sur parcs à fers, soit après fabrication ou montage) ; après un début de corrosion, la calamine part facilement à la brosse métallique.

Les surfaces d'acier protégées par galvanisation peuvent être peintes avec des peintures compatibles avec le zinc mais doivent être soigneusement dégraissées pour éviter le décollement de plaques de peinture. Il faut noter que la peinture ne doit pas être appliquée sur certaines surfaces (cas des assemblages par boulons HR précontraints certifiés à serrage contrôlé).

Les produits grenaillés et peints

Les produits grenaillés et peints (telles que les poutrelles) subissent dans les ateliers de construction métallique ou dans les ateliers spécialisés en peinture un traitement comprenant un nettoyage des surfaces d'acier très poussé par grenaillage qui élimine toutes les impuretés (calamine, rouille,...) suivi immédiatement de l'application d'une couche de peinture antirouille. Ce traitement effectué en usine n'assure qu'une protection temporaire et doit être complété par un revêtement définitif.

Bardage prélaqué en façade de l'immeuble de logements Marcel-Dassault à Boulogne-Billancourt.
É. Dubosc et M. Landowski architectes.



Les critères de garantie sont fixés en France par l'Office national d'homologation de garantie des peintures industrielles (ONHGPI). Ces critères sont étalonnés par dix photographies qui montrent dix degrés de corrosion. Par exemple un critère de 5 ans cliché 7 signifie que la corrosion au terme de 5 ans devra correspondre à la photo de référence n° 7.

Les tôles prélaquées et plastifiées

Il existe un grand choix de tôles minces (0,4 à 1,5 mm d'épaisseur) recouvertes de peinture en continu cuite au four, appelées tôles prélaquées ou prépeintes. La peinture (« ou revêtement organique ») est appliquée sur une tôle déjà galvanisée et comporte un primaire et une couche de finition. Ces tôles peuvent être « plastifiées » quand elles sont recouvertes d'une feuille de matière plastique par contre-collage. Ce procédé dit « skin-plate » permet une grande variété d'aspect, jusqu'au faux bois ! Le film plastique n'a cependant qu'une résistance limitée en extérieur, notamment à cause de l'action des UV.

Les tôles prélaquées sont produites par les usines sidérurgiques et présentent une grande variété quant à la nature des peintures qui leur sont appliquées, à leur épaisseur et à leurs coloris. Des nuanciers standard existent chez tous les fabricants, mais il est possible d'obtenir n'importe quelle teinte désirée lorsque la quantité de panneaux dépasse 2 000 m^2. De nombreuses textures de peinture sont également disponibles, mate ou brillante, nacrée, pailletée, etc. Il est possible de ne pas appliquer le même traitement sur les deux faces de la tôle.

La résistance à la corrosion des tôles prélaquées est supérieure à celle des tôles galvanisées. Le choix du revêtement qu'elles reçoivent dépend du milieu dans lequel elles seront exposées. Des revêtements à base de polyvinyle difluorure (PVDF) augmentent encore la durabilité de la protection. Tous ces revêtements ont bénéficié des progrès accomplis dans le domaine de l'automobile et leur tenue dans le temps est excellente, au-delà de vingt ans.

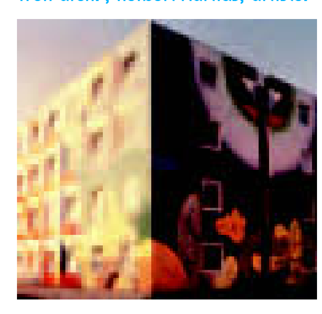
Les tôles émaillées

L'émaillage des tôles en acier leur assurent une protection très efficace et très durable contre toute source de corrosion, aux UV et aux graffitis. Une couche d'émail est déposée par divers procédés sur la surface de la tôle de nuance spéciale. La cuisson au four à 830 °C permet de vitrifier l'émail et de créer une liaison indissociable entre l'émail et son support. On peut obtenir des couleurs très variées et reproduire facilement des motifs ou des images. L'acier émaillé est aussi utilisé en signalétique, en industrie et en salles blanches.

Exemples de nuanciers de peinture pour tôles prélaquées.



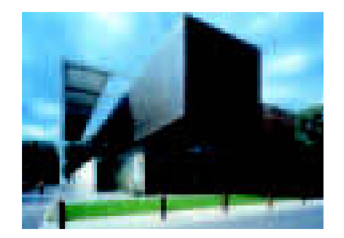
Façade de logements d'étudiants à Rüsselheim, Allemagne. Wendeling Wolf arch. ; Herbert Martius, artiste.



Les aciers inoxydables

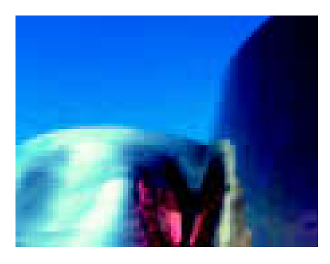


Plaques d'acier inoxydable dont une poli miroir en façade. UFR de géographie, Villeneuve-d'Ascq, France. Legendre, Desmazières et Larrondo architectes.



Écailles en losange d'acier inoxydable sur la façade de la médiathèque de Sélestat, France. J. Orth et Ch. Schouvey architectes.

Façade en acier inoxydable teinté. Experience Music Hall à Seattle, États-Unis. F. O. Gehry & Associates architectes.



L'acier inoxydable est un alliage d'acier contenant au minimum 10,5 % de chrome et moins de 1,2 % de carbone. Sa résistance à la corrosion est obtenue grâce à la réaction du chrome à l'oxygène qui crée en surface une très fine couche passive autoprotectice. Cette résistance à la corrosion peut être encore améliorée par l'addition de composants tels que le nickel, le molybdène, le titane,…

Il existe plus de cent nuances d'acier inoxydable. Elles sont classées en cinq grandes « familles » qui (norme européenne NF EN 10088-2) :
– martensitiques : 0,1 % de carbone, 12 à 18 % de chrome ;
– ferritiques : de 0,02 à 0,06 % de carbone, de 0 à 4 % de molybdène et de 11 à 29 % de chrome ;
– austénitiques : de 0,015 à 0,10 % de carbone, de 0 à 4 % de molybdène, de 7 à 25 % de nickel et de 17 à 20 % de chrome ;
– austénitiques réfractaires : de 0,2 % maximum de carbone, de 11 à 22 % de nickel et de 19 à 26 % de chrome ;
– austéno-ferritiques (duplex) avec par exemple : de 0,02 % de carbone, de 3 % de molybdène, de 5,5 % de nickel et de 22 % de chrome.
À chacune correspond des caractéristiques mécaniques spécifiques : degré de dureté, limite d'élasticité, résistance à la rupture, capacité d'allongement,…

Les nuances d'acier inoxydable sont désignées en Europe par une série de chiffres de type 1.4000 et aux États-Unis par trois chiffres. Par exemple, 1.4301 (ou 304) correspond à un inox austénitique qui comprend 18 % de chrome et 10 % de nickel. En outre, la lettre L dans l'appellation américaine indique un très faible taux de carbone qui garantit une meilleure résistance aux milieux agressifs, à l'instar de la nuance 304 L (ou 1.4306).
Le choix de la nuance appropriée à l'environnement dans lequel se trouve l'élément à protéger (environnement industriel, maritime, inox alimentaire…) sera de préférence le fait de spécialistes.

L'acier inoxydable s'utilise sous forme de tôle en couverture, en façade, en habillage, en luminaire, en revêtement de sols, en serrurerie, dans les conduits de fumée, etc. Il s'utilise sous forme de tubes pour les structures et les canalisations, de fils pour les câbles ou les mailles tissées. Il existe même des armatures pour béton armé en inox pour améliorer la durabilité du béton.
L'inox peut aussi se polir et se colorer de multiples façons avec une très grande variété d'aspects de surface.

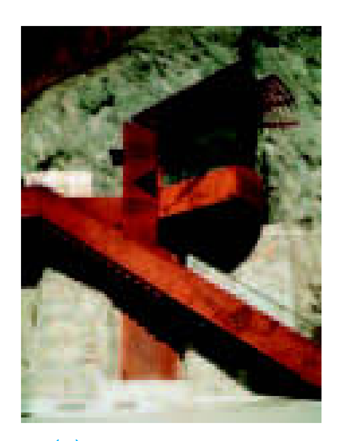
Il existe également et uniquement pour la couverture de bâtiments, des nuances d'aciers inoxydables revêtus d'étain sur les deux faces. Ce revêtement a pour fonction essentielle de faciliter le brasage effectué par le couvreur et de donner un aspect « mat » à la surface obtenue par une patine naturelle au fil des ans.

Les aciers patinables

Il existe aussi des aciers faiblement alliés, dits patinables ou autopatinables qui sont protégés contre la corrosion par leur couche d'oxyde. Ce sont des aciers qui contiennent un faible pourcentage de cuivre (de l'ordre de 1 %). Ils sont plus connus sous leur nom de marque, tel que Corten, Indaten ou Paten.

La protection est réalisée une fois que le produit est exposé à l'atmosphère et à la pluie et qu'une couche brune foncée d'oxyde, qu'on appelle aussi patine, s'est formée. Cette couche d'oxyde est résistante et relativement étanche. Elle constitue donc un frein à la corrosion qui ne peut plus se poursuivre en profondeur. Toutefois, elle a tendance à s'user et ne fait que ralentir la corrosion. Il faut donc « surdimensionner » les pièces en acier patinable afin de tenir compte de cette perte de matière qui peut atteindre des valeurs de l'ordre de 1 mm ou plus en 50 ans, par surface exposée. On peut aussi appliquer une peinture antirouille après sablage, notamment sur les parties cachées, ce qui améliore encore la durabilité du matériau.

L'utilisation de ce genre d'acier est interdite dans des milieux agressifs et pour des constructions en contact permanent avec de l'eau ou de l'humidité condensée. Il faut aussi très soigneusement éviter toute possibilité de rétention d'eau qui finirait par provoquer une altération du matériau. Par ailleurs, la formation de la couche protectrice qui peut durer plusieurs années, s'accompagne d'un dégagement de rouille qui peut salir les parties non ferreuses de la construction. Il conviendra par conséquent de récolter toutes les eaux de ruissellement qui auront été en contact avec l'acier patinable. Afin que cet acier ait une teinte plus ou moins uniforme, il sera préférable de procéder à un léger sablage des pièces avant leur mise en place. Là encore, il est conseillé de consulter des spécialistes pour la mise en œuvre.



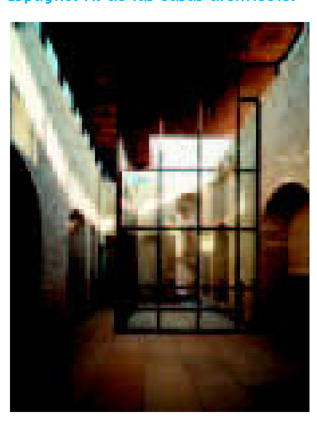
Belvédère de Mizoen, France. I. Hérault et Y. Arnod architectes.



Centre universitaire RVU à Hilversum, Pays-Bas. MVRDV architectes.



Centre hispano-portugais à Zamora, Espagne. M. de las Casas architecte.



10 LA PROTECTION CONTRE L'INCENDIE

Les exigences réglementaires de protection contre l'incendie sont établies en fonction des types de bâtiment et de leur taille, sachant que la fumée est le risque majeur en cas de sinistre. Elles visent avant tout la sécurité des personnes. Les risques pris en compte sont donc de deux ordres :
– les risques actifs : le risque d'éclosion de l'incendie et l'évaluation des potentiels calorifiques des locaux par la détermination de la masse combustible inhérente à un bâtiment : matériaux de construction, mobilier, décoration… ;
– les risques passifs : la fragilisation de la structure qui peut entraîner une perte de stabilité et la ruine éventuelle d'un bâtiment.

La stabilité des structures ne doit donc pas être considérée isolément. Elle doit être évaluée globalement, en tenant compte d'un ensemble de critères qui relève plus particulièrement de la conception architecturale :
– prévention de l'incendie : systèmes de détection, alarme, réseau d'eau (sprinklers), moyens de première intervention ;
– protection des personnes : confinement du feu, cantonnement des fumées et désenfumage, issues de secours, lisibilité des circulations suivant la catégorie de bâtiment, durée de stabilité requise du bâtiment pour permettre l'évacuation ;
– conditions d'intervention des secours : formation du personnel, normes de sécurité, accès au bâtiment.

La caractérisation des éléments

La caractérisation des matériaux et des éléments de construction se fait suivant deux principales notions : la réaction au feu et la résistance au feu.

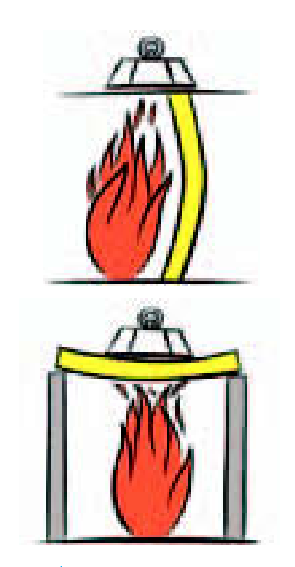
La réaction au feu

Elle caractérise l'inflammabilité, la combustibilité et la quantité de chaleur dégagée par la combustion.

Les matériaux eux-mêmes sont classés en cinq catégories suivant leur propension à alimenter un feu : M0, M1, M2, M3, M4. À terme, les Euroclasses (A1, A2, B, C, D, E, F) remplaceront le classement M. L'acier, ininflammable, est classé M0, de même que la pierre, la plâtre, le béton armé, etc. Le classement du bois peut varier de M1 à M5 suivant les cas.

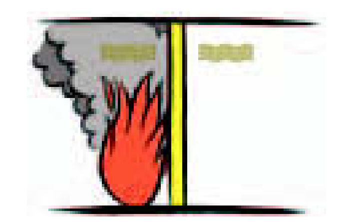
La résistance au feu

Mesurée en minutes suivant la courbe ISO 834 température-temps, elle se décline en trois classes :
– « stabilité au feu » (SF) ou « résistance au feu » (R) : capacité mesurée en minutes d'un élément de structure à assurer son rôle dans le bâtiment ;

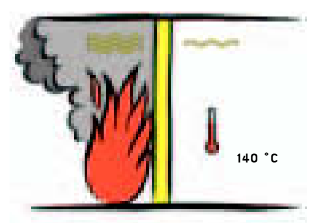


Stabilité au feu (SF) = (R). Temps en minutes durant lequel la résistance mécanique sous charge est assurée.

– « pareflammes » (PF) remplacé, suivant les produits, par « étanchéité » (E) ou « résistance et étanchéité » (RE) : aptitude d'une paroi à s'opposer au passage des flammes ou de gaz chauds qui pourrait entraîner la propagation de l'incendie ;
– « coupe-feu » (CF) qui devient « étanchéité et isolation » (EI) ou « résistance-étanchéité-isolation (REI) : l'aptitude d'une paroi à maintenir une isolation suffisante pour que la température sur la face non-exposée au feu ne dépasse pas certaines valeurs (140 °C en moyenne), dangereuses pour des occupants ou susceptibles de rallumer l'incendie.
Cette gradation montre qu'une caractérisation pare-flammes suppose la stabilité au feu et que le coupe-feu suppose le PF et la SF.



Pare-flamme (PF) = (E ou RE)
Temps pendant lequel l'étanchéité sous charge aux flammes, gaz chauds et toxiques, est assurée sous feu ISO de laboratoire.



Coupe (CF) = (EI ou REI).
Le degré coupe-feu (isolation thermique) définit le temps pour atteindre la température de 140 °C en moyenne et 180 °C ponctuellement sur la face opposée au feu, sous feu ISO de laboratoire.

La règlementation en France

Protéger la vie des hommes contre les fumées en cas d'incendie et les risques de panique en facilitant l'évacuation ou la mise à l'abri des occupants et l'intervention des secours publics, est une obligation réglementée par les pouvoirs publics. Ceux-ci se sont donc attachés à définir des règles à respecter lors de la construction d'un bâtiment en fonction de sa destination. La réglementation classe les bâtiments en fonction de leur destination, de leur taille et de leur accessibilité. Ce classement par catégories définit des prescriptions applicables aux éléments constitutifs de leur construction, auxquelles s'ajoute une réglementation sur les matériaux concernant les risques de propagation du feu à partir d'un immeuble voisin.
La réglementation distingue six catégories principales de bâtiment.

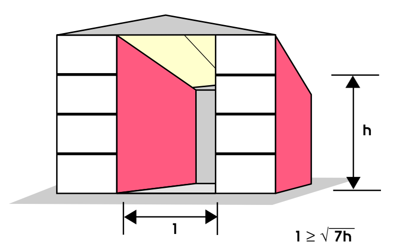
Les logements

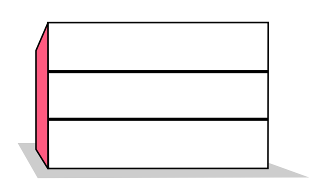
Il sont eux-mêmes classés en quatre familles en fonction de leur caractère individuel ou collectif, puis du nombre de leurs niveaux et de l'indépendance ou non des locaux contigus (maisons en bande ou isolés). La stabilité SF requise varie de 15 min à 90 min suivant la hauteur du bâtiment.

Les établissements recevant du public (ERP)

Il sont classés à partir de deux critères :
– le nombre de personnes reçues à l'intérieur ;
– la nature des activités abritées.
Les ERP sont classées en cinq catégories. La stabilité requise varie de 30 min à 90 min. À noter qu'il n'y a aucune exigence de stabilité pour les ERP de cinquième catégorie ; cela concerne un grand nombre de locaux, recevant en général moins de deux cents personnes à la fois.
Les atriums sont régis par des dispositions particulières qui permettent en général d'éviter une protection de la charpente si elle est visible, si l'atrium est assez large et s'il y a un dispositif de désenfumage suffisant.

Le volume d'un atrium non protégé doit être tel que sa largeur soit supérieure à la racine de sept fois la hauteur du plancher le plus élevé.
Exemple : si le plancher haut est à 9 m (soit R + 3), l'atrium doit avoir une largeur l, telle $l = \sqrt{7 \times 9}$, soit 7,95 m





Immeubles de bureaux : aucune contrainte si la hauteur du plancher haut est inférieure ou égale à 8 m.

Les immeubles de bureaux

Aucune stabilité n'est requise lorsque le plancher haut est à moins de 8 m. Au-delà, la stabilité est de 30 min.

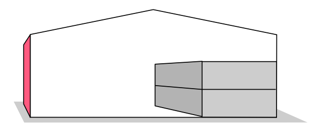
Les immeubles de grande hauteur (IGH)

Pour les IGH, la sécurité ne repose pas uniquement sur l'évacuation mais sur le compartimentage et la limitation de la masse combustible. Un immeuble est IGH si le dernier niveau est situé à plus de 50 m pour les immeubles d'habitation et à plus de 28 m pour les autres immeubles. La réglementation est plus contraignante et prévoit entre autres une stabilité au feu de 120 min.

Les entrepôts

On distingue les installations classées lorsqu'elles contiennent plus de 500 t de produits combustibles.

Les entrepôts sont soumis à déclaration lorsqu'il dépassent 5 000 m^3, à autorisation lorsque leur volume fait plus de 50 000 m^3. Les entrepôts de moins de 50 000 m^3 d'une hauteur inférieure à 10 m (à la sablière) ne font l'objet d'aucune contrainte de stabilité. Au-delà de 10 m, la stabilité au feu est de 30 min pour la structure et de 120 min pour les planchers s'il y en a.

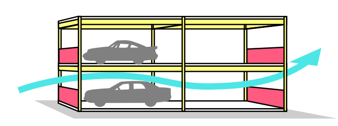


Entrepôt soumis à autorisation, d'une hauteur supérieure à 10 m à la sablière ou entrepôt à deux niveaux et plus : stabilité requise de 30 min pour les structures et de 120 min pour les planchers.

Les entrepôts soumis à autorisation font l'objet d'une réglementation particulière (arrêté du 5 août 2002) qui prend en compte la taille des cellules, la hauteur du bâtiment au faîtage (plus ou moins de 12,5 m), le recoupement en cellules et les mesures actives (sprinklers), avec la possibilité de mettre en œuvre une approche d'ingénierie incendie ce qui permet généralement l'utilisation d'acier non protégé. Une attention particulière est portée au risque de ruine en chaîne de la structure et au non-effondrement de la structure en feu vers l'extérieur. Aucune exigence n'est toutefois requise si la taille des cellules ne dépasse pas 3 000 m^2 (6 000 m^2 avec sprinklers) et la hauteur 12,5 m.

Les parcs de stationnement ouverts

Dans de nombreux pays, les parkings à étages ouverts ne font l'objet d'aucune exigence de stabilité au feu compte tenu du faible potentiel calorifique de tels ouvrages. Elle varie en France de 30 min à 90 min suivant la hauteur du parking. Il est toutefois désormais possible de répondre à l'exigence règlementaire avec des structures en acier non protégées, à condition qu'il y ait une mixité de la structure avec le plancher et sous réserve d'une justification par le calcul (arrêté du 22 mars 2004). Les scénarios d'incendie à prendre en compte ont été validés par le ministère de l'Environnement.



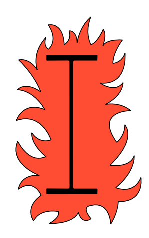
Actuellement en France, les parcs de stationnement ouverts de plus de 250 véhicules à deux niveaux sont soumis à une obligation de stabilité au feu des structures de 30 min, que l'on peut obtenir par des structures métalliques non protégées.

Le comportement des structures

L'acier est un matériau incombustible mais bon conducteur de la chaleur. Lorsqu'un élément de structure en acier est soumis à un incendie, sa température s'accroît, et ses propriétés mécaniques se réduisent comme pour tout autre matériau. La capacité portante de l'élément diminue par conséquent et sa déformation augmente. Si la déformation est trop importante, il peut y avoir effondrement.

La stabilité au feu d'un élément n'est plus assurée quand, sous l'effet de l'élévation de température, sa résistance mécanique diminue jusqu'au niveau de contraintes auxquelles il est soumis. On atteint à cet instant la température critique, comprise entre 450 °C et 800 °C, qui dépend de plusieurs paramètres : nuance de l'acier, niveau de contrainte, type de profil, conditions de liaisons et de chargement, et facteur de massiveté (rapport de la surface exposée au flux thermique au volume par unité de longueur). Plus ce facteur est élevé plus l'échauffement est rapide. Entre un poteau, échauffé sur tout son pourtour, et une poutre supportant une dalle en béton qui n'est échauffée que sur trois côtés, le facteur de massivité sera donc différent. Ainsi, chaque profil en acier sera caractérisé par deux facteurs de massiveté, selon qu'il est soumis à l'incendie sur trois ou quatre côtés.

Facteur de massiveté :
périmètre élevé, volume faible = échauffement rapide.



Périmètre faible, volume élevé = échauffement plus lent.



Il n'en reste pas moins qu'il est difficile de répondre à une exigence réglementaire de stabilité au feu ISO supérieure à 30 min avec des profils métalliques non protégés et utilisés à des niveaux de contrainte usuels. Les composants métalliques sont en effet désavantagés du fait qu'ils se présentent en petites sections et qu'ils s'échauffent rapidement lorsqu'ils ne sont pas protégées.

Il faut aussi noter qu'il existe de nombreux types de bâtiments dans lesquels aucune exigence de stabilité au feu n'est requise : ERP de 5e catégorie et bureaux avec plancher haut < 8 m, bâtiments agricoles, bâtiments industriels, entrepôts limités en hauteur. Les habitations de 4e famille requièrent une stabilité de 15 min que l'on peut assurer avec de l'acier non protégé.

La maîtrise des risques

Un certain nombre de techniques maîtrisées et éprouvées peuvent être mises en œuvre pour respecter rigoureusement les dispositions de sécurité. Cependant avant de décider de protéger systématiquement et sans analyse des structures métalliques, il faut considérer la nature des risques réels qui se présentent pour les occupants, pour les secours et pour les biens.

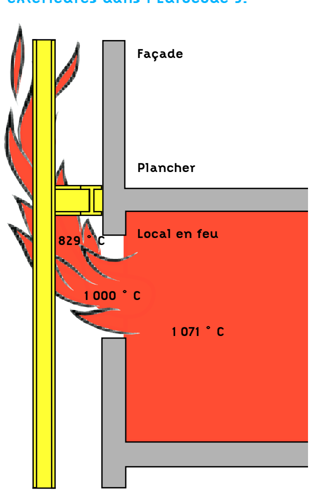
Il faut ainsi distinguer les éléments principaux (structure principale) dont la ruine risque de provoquer celles d'autres parties du bâtiment, des éléments secondaires (structure secondaire) qui ne présentent pas ce risque. Une sta-

bilité au feu doit être assurée pendant un temps minimal, fixé par la réglementation, pour les éléments qui conditionnent la résistance au feu de parois (poutraisons de planchers par exemple) et un degré coupe-feu pour les éléments qui doivent permettre l'évacuation des occupants ou l'accès des secours (escaliers de secours par exemple).

L'évolution de l'ingénierie incendie

La sécurité incendie repose aujourd'hui sur deux approches, l'une descriptive et l'autre performantielle. Dans la première, les pouvoirs publics fixent des durées de résistance au feu à respecter : ces exigences concernent chaque élément isolément. Les méthodes de calcul, de dimensionnement et d'essai permettent par ailleurs de prouver et de justifier que les éléments utilisés satisfont aux exigences demandées. Dans la seconde, l'approche de la sécurité incendie est une approche globale par l'appréciation du bâtiment considéré comme un tout. Un certain nombre de paramètres sont pris en compte pour calculer le niveau de sécurité d'un bâtiment, tel que la probabilité de naissance d'un incendie, les conditions d'évacuation des occupants, le comportement des structures en fonction de la localisation du feu ou les conditions de la propagation d'un feu. Cette évaluation des risques permet un compromis optimal entre l'esthétique, le fonctionnel et le coût, tout en améliorant la sécurité.

Méthode de calcul des structures extérieures dans l'Eurocode 3.



Il est dès aujourd'hui possible de faire appel à des calculs avancés de sécurité incendie, moyennant des hypothèses de scénario incendie validées par les autorités locales compétentes (arrêté du 22 mars 2004). L'intérêt d'une telle démarche d'ingénierie incendie fondée sur des hypothèses de feu réel (et non pas conventionnel ISO) est d'approcher le phénomène d'une façon réaliste et globale, en tenant compte par exemple des dispositifs de protection (détection, alarme, désenfumage, sprinklage, issues de secours,...). Le résultat aboutit à une meilleure sécurité globale.

Un dimensionnement optimal de la protection peut conduire à sa suppression totale. Les Eurocodes contiennent déjà ces principes de calcul avancé (Eurocode 3 partie feu). Le CTICM (Centre technique et industriel de la construction métallique) dispose par exemple d'outils capables de déterminer l'élévation de température des ossatures extérieures en fonction de leur position par rapport à la façade, du vent et de son orientation, et de la masse combustible mobilisable à l'intérieur des locaux. Cette température est à comparer à la température critique des différents éléments de l'ossature.

La protection des structures

Tout immeuble doit pouvoir garder son intégrité structurale au moins pendant le temps d'évacuation des occupants défini de manière règlementaire. Les dispositifs de protection incendie sont donc prévus pour ralentir l'élévation de température des éléments structurels. Soit on éloigne la structure de la source de chaleur en plaçant la structure à l'extérieur du bâtiment, soit on met en place une protection thermique entre l'acier et le feu pour prolonger la durée de stabilité des structures quand cela est nécessaire. La protection présente cependant l'inconvénient d'être onéreuse, d'alourdir la structure et de diminuer les qualités esthétiques et/ou architecturales des matériaux.

Les éléments de structure situés à l'extérieur des bâtiments représentent un cas particulier. Contrairement aux éléments qui sont entourés de flammes à l'intérieur d'un local, ils ne sont exposés qu'au rayonnement et à la convection des flammes sortant par les baies. Ils sont d'autre part soumis à des échanges de chaleur avec l'air ambiant qui tendent à les refroidir. L'échauffement de tels éléments dépend donc de leur emplacement vis-à-vis des ouvertures. Ainsi un poteau ou une poutre suffisamment éloigné d'une baie ou situé à l'extérieur d'un cône de 45° permettra de s'affranchir de la protection. De même, les structures en câbles et tirants de faible massiveté sont généralement situées à l'extérieur des ouvrages. Leur échauffement est moindre en cas d'incendie. Lorsque les tirants ne sont pas à l'extérieur des bâtiments, une solution pour assurer leur stabilité au feu consiste à les disposer entre des écrans : cloisons, caissons…
On distingue trois grandes familles de protection.

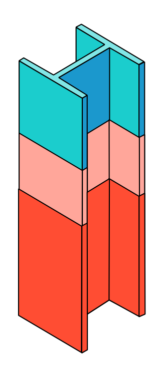
La protection rapportée autour de l'acier

La peinture intumescente

Ce produit se présente sous l'aspect d'un film de peinture de 0,5 mm à 4 mm d'épaisseur. Chauffé entre 100° et 200 °C, il gonfle et se transforme en mousse à l'aspect meringué dont l'épaisseur peut atteindre 30 à 40 mm. Il provoque alors une isolation thermique des structures. Il est utilisé pour des degrés SF de 30 min, plus rarement pour une SF de 60 min ou 120 min. Produit relativement onéreux, il permet cependant de ne pas altérer la perception visuelle des structures.

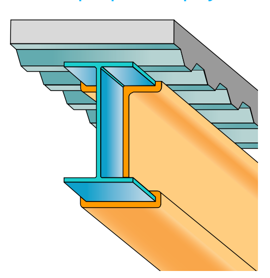
Les produits projetés (flocage)

Les produits dits de flocage sont projetés directement sur l'élément. Ils sont généralement composés soit de produits de faible densité (< 250 kg/m^3) constitués de fibres minérales agglomérées par un liant, soit de produits pâteux à forte densité (>450 kg/m^3) tels que vermiculite, ciment, plâtre, laitier, tous



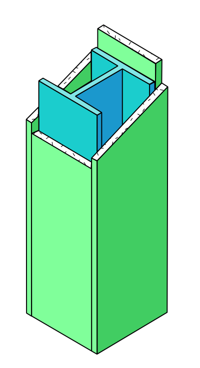
Protection par peinture intumescente avec un primaire (bleu), un enduit intumescent (rose), une peinture de finition (rouge).

Protection par produits projetés.



exempts d'amiante. Les enduits pâteux sont le plus souvent préférables aux enduits fibreux. Ils sont appliqués en plusieurs couches. Certains d'entre eux peuvent aussi s'appliquer sur une structure non protégée contre la corrosion. Ces produits peuvent procurer des SF allant jusqu'à 240 min. Secs et compactés par roulage, ils peuvent être peints. Ces matériaux présentent l'inconvénient d'être fragiles (cas des enduits fibreux) et d'un aspect peu esthétique. On les réserve aux parties cachées de la structure (par exemple poutres dissimulées par un faux plafond).

Les produits en plaque



Protection par produits en plaques.
Exemple : plaques de plâtre

	Standard	Spéciales feu
2 BA 13	30 mn	60 mn
2 BA 15	30 mn	60 mn
2 BA 18	60 mn	90 mn
4 BA 13	60 mn	120 mn

Les produits en plaque forment un caisson isolant autour du profil métallique. Ils sont généralement fabriqués à base de fibres minérales (plaques de faible densité < 180 kg/m^3) ou de plâtre, vermiculite, ou composants silico-calcaires (plaques de forte densité > 450 kg/m^3).

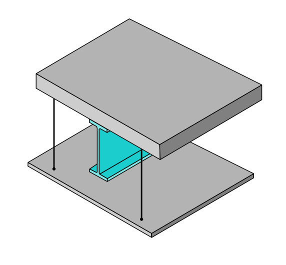
Les plaques sont fixées mécaniquement sur une ossature secondaire propre par vissage ou par collage. Dans les deux cas de figure, une mise en œuvre soignée des joints est nécessaire. Cette technique est particulièrement utilisée pour des profils de section constante. Il est possible d'obtenir jusqu'à 240 min de stabilité au feu.

Le plâtre est le matériau le plus utilisé parce qu'il est économique, léger, maniable et partiellement composé avec de l'eau de cristallisation qui lui assure son bon comportement au feu. En assurant la protection au feu, il a aussi le mérite de constituer un parement de paroi verticale comme horizontale prêt à la finition. L'utilisation de plaques de plâtre spéciales feu permet de doubler la durée de protection.

Les laines

Lorsqu'un système constructif composé d'une structure métallique et de parois métalliques ne peut assurer à lui seul la stabilité demandée, on utilise des laines de roche ou des complexes laine de roche + réfractaire pour résister aux très hautes températures sur une durée de temps importante. Dans la majorité des cas, les laines conviennent pour respecter l'exigence de résistance au feu des parois décrites par la réglementation.

Protection par écran : principe de plafond suspendu résistant au feu.



La laine de roche utilisée, dans les cas de forte résistance au feu, doit :
– assurer la tenue mécanique (avec ou sans fixations selon l'ouvrage) ;
– résister à la chaleur ;
– conserver la performance de la paroi pour la durée déterminée.
Elle doit donc répondre aux caractéristiques suivantes :
– forte masse volumique > 70kg/m^3 ;

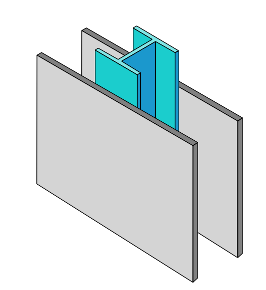
– faible teneur en liant voire sans liant ;
– forte rigidité du produit ;
– composition spécifique (choix des matières premières).

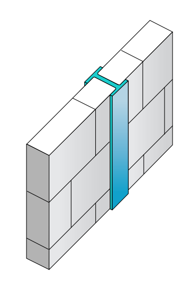
Les protections par écran

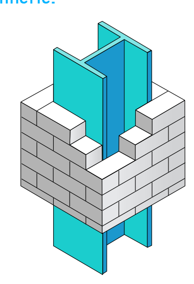
Il s'agit soit de plafonds suspendus, soit de panneaux de cloison qui, par l'interposition entre le foyer et l'ossature en acier, ralentissent l'échauffement de cette dernière. Une attention toute particulière doit être apportée au mode d'assemblage et de fixation et plus particulièrement à toutes les jonctions : entre les éléments d'écran eux-mêmes et entre les éléments d'écran et les discontinuités créées (cloisons, dalles, poteaux) afin que le feu ne puisse pas se propager dans les plénums.

En combinant la fonction de protection à celles du cloisonnement, de l'isolation thermique ou phonique et du parement esthétique, ces écrans offrent l'avantage d'un coût réduit.

L'utilisation d'écrans horizontaux ou verticaux implique que le produit concerné ait subi un essai approprié de résistance au feu. Pour les plafonds suspendus ou les cloisons, les procès verbaux officiels délivrés par un laboratoire agréé donnent le degré de résistance au feu pouvant être obtenu. Des écrans métalliques appelés déflecteurs peuvent également être fixés sur les structures exposées à protéger. Ces déflecteurs sont susceptibles de participer à la composition architecturale.


Protection par écran : poteau intégré dans des cloisons.


Protection par écran : poteau partiellement protégé par la maçonnerie.


Protection par écran : poteau intégré à la maçonnerie.

Les structures irriguées en profils creux

Les profils creux sont remplis en permanence d'eau qui pourra ou non circuler entre les différents éléments. Quel que soit le procédé, la température de l'eau n'excède pas 130 °C sous pression, de sorte que l'acier se trouve maintenu à 200 °C ou 300 °C au maximum, température inférieure à sa température critique. Ce procédé n'est que rarement employé à cause du coût de maintenance qu'il génère.

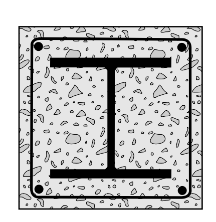
Les éléments mixtes acier-béton

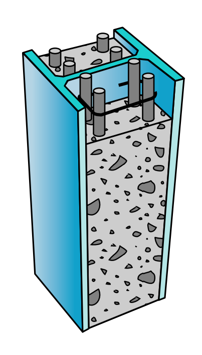
Les poteaux mixtes

À charges égales et à résistance au feu égale, les poteaux mixtes présentent des sections réduites par rapport à un poteau en béton. Le poteau mixte est de surcroît bien adapté à la préfabrication.

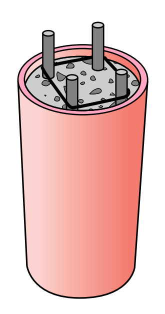
Il existe trois types de poteaux mixtes.

Enrobage total d'une poutrelle en H.



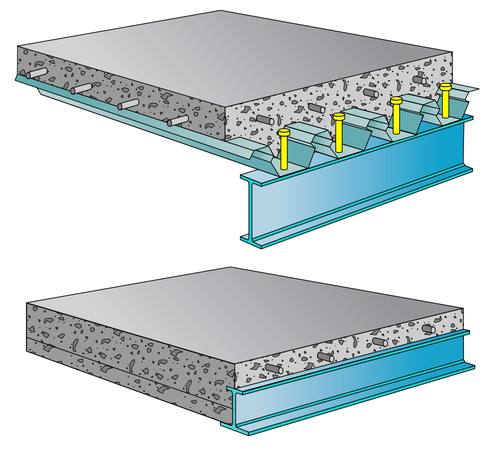


Poteau bétonné entre les ailes.



Poteau mixte acier-béton en profil creux.

Planchers collaborants
– dalle béton et poutres métalliques sont solidarisées grâce aux goujons soudés sur l'aile supérieure des poutres.
– profilés en H ou en I intégré dans la dalle béton.



Les profilés enrobés de béton

C'est le type le plus ancien de poteau mixte. Le béton et les armatures de béton n'y ont pas une part prépondérante dans la reprise de la charge. Cette reprise de charge est surtout assurée par le profilé qui bénéficie d'une bonne protection thermique.

Les profilés bétonnés entre les ailes

Ce type de poteau peut être dimensionné pour des durées de stabilité allant de 30 min à 120 min. Le béton contient des armatures qui contribuent à supporter les charges. Des étriers ou des goujons sont soudés à l'âme du poteau pour assurer la solidarisation du béton armé avec le profilé d'acier.

Les profilés creux remplis de béton

Les profils creux en acier offrent une solution intéressante et aisée pour la réalisation de poteaux mixtes. Les expériences de résistance au feu montrent qu'une armature minimale est nécessaire dans le profilé. Il est impératif de prévoir des percements pour l'évacuation de la vapeur d'eau dans les parties supérieure et inférieure des poteaux, à chaque niveau ou tous les 5 m. Cette solution préserve l'esthétique et la forme du poteau ainsi que la liberté de toutes les formes d'attache ou de liaison.

Les poutres mixtes

Un des avantages des poutres mixtes consiste à minimiser la hauteur des poutres en associant l'acier et le béton. Le béton qui résiste mal aux efforts de traction n'est utilisé que dans la partie supérieure comprimée et l'acier dans la partie inférieure tendue. On distingue trois types de poutre mixte.

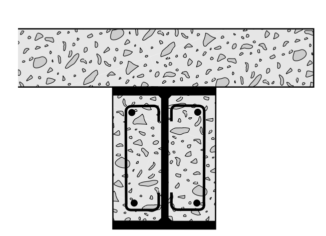
Les profilés connectés à une dalle en béton

La liaison entre le profilé et la dalle en béton est assurée par des connecteurs soudés sur la semelle supérieure du profilé. La dalle béton peut être une dalle pleine ou coulée sur un bac acier collaborant. Pour augmenter la stabilité au feu, on peut avoir recours à des protections rapportées ou surdimensionner la section.

Les profilés laminés noyés dans l'épaisseur d'une dalle béton

Ce dispositif confère une très bonne résistance au feu du fait de l'enrobage presque complet de la poutrelle dont seule la semelle

inférieure reste apparente. Cependant, et par nature, il entraîne une épaisseur importante de la dalle en béton afin d'y inclure la quasi-totalité de la hauteur de la poutrelle et un recouvrement de 5 cm de béton au minimum au-dessus de l'aile supérieure du profilé.


Enrobage partiel d'un profilé en H.

Les profilés bétonnés entre les ailes

La réalisation et la mise en œuvre de ce type de profilés s'identifie à celle des poteaux. Les connexions dans ce cas de figure ne sont pas indispensables. Cependant, si elles sont faites à une dalle béton ou un plancher à bacs collaborants, leur section pourra être réduite, tout en ayant une bonne capacité de résistance à l'incendie.

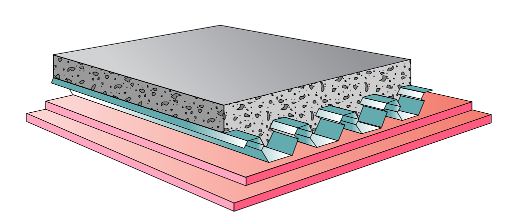
Les dalles mixtes

Les dalles mixtes sont constituées de béton et de tôles d'acier nervurées. Les tôles profilées ont un rôle d'armature et de coffrage, autorisant une mise en œuvre rapide et économique. La face inférieure des tôles nervurées ne nécessite généralement aucune protection.

Les dalles mixtes ont un degré coupe-feu de 30 min sans protection particulière. Une résistance supérieure peut être obtenue aisément et à faible coût par l'ajout de barres d'acier enrobées dans les nervures. Il en sera de même pour les dalles coulées avec un bac acier utilisé en coffrage perdu.

Une alternative est possible par protection projetée en sous-face du bac acier ou par adjonction d'un faux plafond coupe-feu du degré requis. Cette solution est particulièrement valable économiquement pour des degrés coupe-feu de 120 min et plus. En cas d'incendie important, le bac acier retient les éclatements du béton.

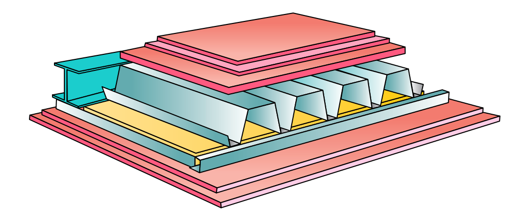
Dalle collaborante : bac acier en queue d'aronde + dalle béton.


Plancher collaborant avec plafond coupe-feu.

Les planchers secs

Du fait de leur composition, le comportement des planchers secs en cas d'incendie est directement lié aux qualités de résistance au feu du faux plafond. Celui-ci doit limiter les températures du plenum qu'il délimite et donc celles des poutrelles du plancher.

Coupe type sur un plancher sec. La résistance au feu du plancher sec dépend des performances du faux plafond.



11 LE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Les 14 cibles HQE®

1. Relation harmonieuse des bâtiments avec leur environnement immédiat
2. Choix intégré des procédés et produits de construction
3. Chantiers à faibles nuisances
4. Gestion de l'énergie
5. Gestion de l'eau
6. Gestion des déchets d'activité
7. Gestion de l'entretien et de la maintenance
8. Confort hygrothermique
9. Confort acoustique
10. Confort visuel
11. Confort olfactif
12. Qualité sanitaire des espaces
13. Qualité sanitaire de l'air
14. Qualité sanitaire de l'eau.

La population mondiale croît sans cesse, consomme plus de biens, de services et d'énergie, produit de plus en plus de déchets. Les activités humaines doivent ainsi veiller à minimiser l'emploi des ressources disponibles, à économiser les énergies et à réduire les pollutions. Nous devons nous soucier de recycler les matériaux existants, de penser et agir en terme de développement durable. Par ailleurs, s'il n'existe pas encore en France de règlementation proprement dite, l'association HQE® a mis au point une démarche formalisée autour de quatorze cibles. Cette démarche opérationnelle vise à maîtriser les impacts des bâtiments sur l'environnement extérieur et créer un environnement intérieur sain et confortable. Elle est applicable aussi bien à la construction neuve qu'à la réhabilitation. La prise en compte de ces cibles aux différentes étapes de conception et de réalisation permet une prise en compte globale du coût. L'acier comme matériau de construction tend à s'inscrire dans cette démarche et à répondre à l'ensemble des préoccupations environnementales.

Le choix des matériaux

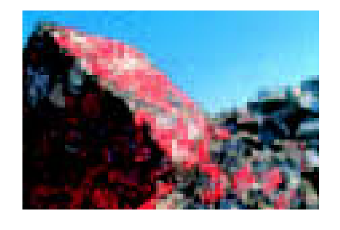
Tous les produits manufacturés ont leur propre cycle de vie dont l'analyse, ou ACV, est l'instrument de mesure de leurs impacts sur l'environnement. Les différentes phases du cycle de vie d'un élément constructif comprennent l'extraction et la transformation des matières premières, son transport, sa mise en œuvre, sa vie en œuvre, jusqu'à sa fin de vie (démolition ou déconstruction, recyclage et le traitement des déchets).
À ce titre, la norme NF P 01-010 (publication automne 2004) destinée aux concepteurs, établit « les bases communes pour la délivrance d'une information objective qualitative et quantitative sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction et leur contribution à celle du bâtiment ». L'information délivrée repose notamment sur les méthodes d'inventaire et d'analyse du cycle de vie décrites dans les normes ISO 14040 et ISO 14041, sur les principes généraux définis dans la norme ISO 14020 et sur le rapport technique ISO 14025. Suivant chaque projet, cette démarche volontaire permet une prise en compte de tous les facteurs, élément par élément en considérant l'assemblage global.



Épandage d'amendements (scories d'aciérie).

Dans le cadre d'une démarche de ce type, le choix d'éléments tout ou partie en acier présente de nombreux avantages liés à son mode de production. L'acier est produit soit à partir de minerai de fer et de coke (filière fonte) – le minerai de fer, de même que le charbon, est très abondant sur terre –, soit à partir de ferraille et d'électricité (filière électrique). Aujourd'hui, entre 40 % et 50 % de la production mondiale d'acier est réalisée à partir de ferrailles recyclées. Cette part d'acier produit à partir d'acier recyclé ne fait que croître. Ainsi, l'acier actuellement immobilisé dans des bâtiments ou des objets sera demain un gisement de matière première.

Acier compacté, en attente de recyclage.



Le procédé de fabrication de l'acier génère relativement peu de déchets ou de substances polluantes pour l'environnement et l'eau qu'il consomme est pour une large part recyclée. Les co-produits de la production de l'acier sont réutilisés, notamment le laitier de haut fourneau comme ballast dans la construction routière ou pour la fabrication du ciment. Les gaz émis sont recyclés ou filtrés. Cependant, et malgré les efforts des sidérurgistes pour réduire la quantité d'énergie nécessaire, la production d'acier à partir de minerai génère du CO_2, à raison deux tonnes par tonne d'acier. Là encore, c'est l'augmentation du recyclage qui pourra apporter une solution à long terme.

Centre de tri de ferrailles.
La séparation des ferrailles avec les autres matières se fait aisément par électro-aimant.

En outre, l'acier se marie facilement avec les autres matériaux. Cela facilite leur choix en fonction de critères environnementaux tout en laissant une grande liberté de conception. Il est par exemple possible d'associer à une ossature métallique des vêtures en bois non tropical ou des façades en verre.

La construction

La mise en œuvre de l'acier permet de minimiser les nuisances lors de la construction. Les éléments en acier sont relativement légers et donc faciles à transporter. En structure, cela représente une économie de matière et permet des fondations réduites qui n'exigent ni fouilles et ni excavations génératrices de déblais et de rotations de camions. Cela limite également l'utilisation sur le chantier de machines telles que les toupies à béton qui occasionnent circulation et salissures.
Les structures ou vêtures en acier sont en grande partie fabriquées en atelier ou en usine, dans un environnement contrôlé où les conditions de travail et de sécurité sont meilleures. La tendance est d'ailleurs à augmenter cette part de la fabrication hors site, pour ne réserver au montage proprement dit que l'assemblage d'éléments préfabriqués. La limite est ici fixée par le gabarit de transport (routier ou fluvial) et par la capacité des moyens de levage. En outre, les structures en acier peuvent être livrées juste à temps pour le montage en « flux tendu », limitant ainsi les besoins de stockage sur le chantier ce qui est particulièrement précieux en site urbain.



Passerelle fabriquée en atelier, en route pour être placée d'une seule pièce, garde-corps et platelage compris, au-dessus de la Leysse, France. Patriarche & Co architectes.

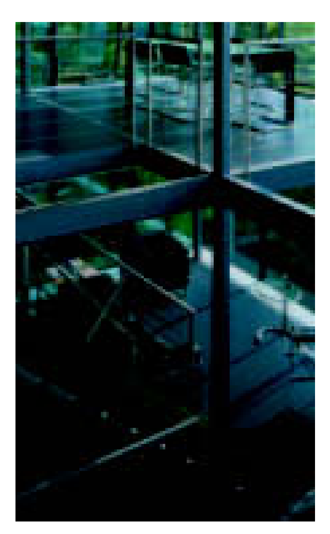


Hall de contrôle de véhicule à Savigny-le-Temple, France, dont la structure est composée de PRS et de profilés du commerce adaptés au montage *in situ*. H. Fricout-Cassignol architecte.

Une construction en acier signifie la mise en œuvre à sec, en partie ou en totalité, de produits finis, sans bruit ni poussière qui polluent et perturbent le voisinage. L'acier n'induisant aucun déchet, les contraintes d'évacuation sont supprimées et la rapidité de montage minimise la durée du chantier.

La « vie en œuvre » du bâtiment

Dans le cycle de vie d'un bâtiment, on distingue, d'une part, l'énergie incorporée qui comporte toute l'énergie nécessaire pour l'extraction, la fabrication et le transport des produits ainsi que la construction et, d'autre part, l'énergie



Maison à Stuttgart, Allemagne. Autosuffisante sur le plan énergétique, elle est conçue pour être facilement déconstruite et recyclée en fin de vie. Werner Sobek architecte.

opérationnelle d'un bâtiment pendant sa durée de vie qui comprend l'éclairage, le chauffage, la ventilation, le fonctionnement, l'entretien, les réparations. Pour un immeuble de bureaux standard, l'énergie consommée pendant la durée de vie du bâtiment peut être jusqu'à dix fois supérieure à l'énergie incorporée. Il est donc essentiel de faire davantage porter l'effort d'économie sur l'énergie consommée que sur l'énergie incorporée. Par exemple, en privilégiant une bonne conception énergétique du bâtiment, l'isolation thermique (du froid comme de la chaleur), l'éclairage et la ventilation naturelle, la facilité de maintenance et la capacité d'évolution dans le temps. L'acier en structure facilite les vastes ouvertures qui laissent pénétrer la lumière et permettent éventuellement de profiter de l'énergie solaire. Très favorables au bilan énergétique, des solutions d'isolation par l'extérieur sont aisément applicables. Avec des charpentes en acier en poteaux-poutres, il n'y a pas de murs porteurs et les maîtres d'ouvrage et les architectes ont un maximum de liberté dans la conception de nouvelles organisations intérieures, voire dans la transformation des façades. Les édifices existants peuvent être facilement agrandis ou transformés et mis aux nouvelles normes d'usage ou même changer d'affectation.

Enfin, l'acier est durable et on sait le protéger de la corrosion. Bien entretenu, il dure longtemps à l'image de bâtiments plus que centenaires comme la Tour Eiffel. En allongeant la vie utile d'une structure, l'énergie incorporée dans celle-ci se répartira sur une période encore plus longue et dès lors on optimisera le rendement de l'énergie dans la construction. Pour rendre possible l'allongement de la vie d'un bâtiment, le projet constructif doit être souple et adaptable. L'acier est un matériau qui convient parfaitement à cette adaptabilité. Ses propriétés naturelles (ductilité, rapport résistance/poids, dureté), lui confèrent aussi une résistance élevée à des contraintes inattendues comme les catastrophes naturelles telles que les séismes.

La fin de vie

Démontage du pont de Hammer à Düsseldorf, Allemagne.

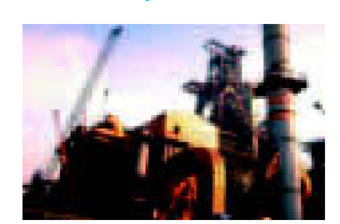


La durée de vie « utile » de tout bâtiment et de toute structure n'est pas illimitée. Les bâtiments qui ne peuvent pas être rénovés doivent pouvoir être démontés ou « déconstruits » plutôt que simplement démolis, à défaut d'être transformés. Ce démontage peut se prévoir dès la conception, à l'image de ce qui se fait aujourd'hui dans l'automobile. L'objectif doit être de pouvoir séparer facilement les composants et d'en trier les matériaux, soit pour les réutiliser soit pour les recycler. Or l'acier se prête bien à un démontage, sans trop de bruit, de poussières et de déblais, en vue de la réutilisation des éléments. En outre, il se trie aisément grâce à ses propriétés magnétiques et peut être recyclé à 100 % et à l'infini sans rien perdre de ses qualités.

Annexe 1 : la fabrication de l'acier

La filière fonte

Le minerai de fer et le coke (du carbone presque pur) sont disposés en couches en haut d'un haut-fourneau. Un haut-fourneau peut atteindre 90 m de hauteur et 14 m de diamètre. Sa production varie entre 2 000 et 15 000 t de fonte par jour. Il fonctionne en continu et on l'arrête en moyenne une fois tous les quinze ans. De l'air chaud à 1 200 °C est insufflé à la base du haut-fourneau. Il provoque la combustion du coke. La chaleur dégagée fait fondre le fer et la gangue dans une masse liquide, où la gangue surnage.



Haut-fourneau.

AGGLOMÉRATION
Minerai de fer
Charbon
HAUT FOURNEAU
COKERIE
Aggloméré
Coke
Ferrailles
Fonte liquide
CONVERTISSEUR
Laitier
FOUR ÉLECTRIQUE
Acier liquide sauvage
STATION D'AFFINAGE
Acier liquide mis à nuance
COULÉE CONTINUE
Brame
LAMINOIR
Tôles en bobine

Schéma du processus de fabrication de l'acier.
En haut à gauche, la production de fonte dans un haut-fourneau, puis la transformation en acier dans un convertisseur.
En haut à droite, la fabrication directe de l'acier à partir de ferrailles.
En bas, l'affinage de l'acier et la coulée continue suivie du laminage à chaud pour obtenir un produit fini, ici des bobines de tôle.

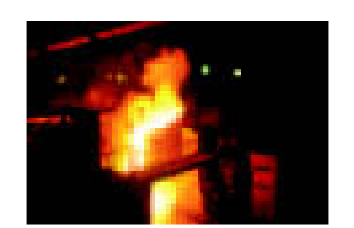
On obtient de la fonte liquide. Celle-ci est alors conduite à l'aciérie dans des wagons pour être versée dans un convertisseur à oxygène.

La filière électrique

L'acier y est directement produit à partir de ferrailles de récupération, sélectionnées suivant leur composition ou leur nuance. Elles proviennent des emballages jetés, des bâtiments, des machines, des véhicules, des chutes de fonte et des aciers récupérés. Ces ferrailles sont chargées dans un four électrique. La fusion a lieu à 1 600° grâce à des arcs électriques. Le métal liquide est conduit ensuite à la station d'affinage de l'aciérie.

L'aciérie

La première étape de l'aciérie est le convertisseur à oxygène où l'on convertit la fonte en acier. On verse la fonte en fusion sur un lit de ferraille. Les éléments indésirables (carbone et résidus) contenus dans la fonte sont alors brûlés en insufflant de l'oxygène pur. On obtient de l'acier liquide dit « sauvage » – l'acier est encore imparfait à ce stade – qui est versé dans une poche. La production d'un convertisseur à oxygène est de 300 t par coulée. Une tonne de fonte permet d'obtenir 1,1 t d'acier (on a ajouté 0,1 t de ferraille).
L'étape suivante est la station d'affinage où les filières fonte et électrique citées précédemment se rejoignent. Les opérations d'affinage (ou de décarburation) et d'additions chimiques se font dans un récipient sous vide, l'acier étant mis en rotation. On insuffle de l'oxygène pour activer la décarburation et réchauffer le métal. La « mise à nuance » de l'acier, à savoir l'ajustement de sa composition chimique, est réalisée avec une grande précision grâce à ce procédé.



Four électrique d'Olaberria en Espagne.

La coulée continue

Vient ensuite l'étape de la coulée continue qui permet le moulage d'ébauches (ou demi-produits). On coule l'acier en fusion en continu dans un moule sans fond. Le métal au contact des parois refroidies à l'eau commence à se solidifier. Il descend du moule, guidé par un jeu de rouleaux, et continue de se refroidir. Arrivé à la sortie, il est solidifié à cœur. Il est immédiatement coupé aux longueurs voulues.
Les demi-produits obtenus sont :
– les brames, de 20 à 30 cm d'épaisseur, 2 m de largeur et de 5 à 6 m de longueur permettent la production des produits plats laminés à chaud (plaques, feuilles, bobines…) ;
– les blooms, de 15 cm à 100 cm de côté, pouvant aller jusqu'à 12 m de longueur, et les billettes, de 15 cm de côté, qui donneront les produits longs laminés à chaud (fil, barres, rails, profilés divers, poutrelles…).

Bibliographie

[1] Antropius, Jean-Daniel – *Planchers à bacs collaborants* – Éditions du CTICM, Saint-Rémy-les-Chevreuse, 1995

[2] Archambault, Guy et Thomas, Loïc – *Sécurité incendie* – Éditions Otua, coll. « Mémentos acier », La Défense, 2002

[3] Bourrier, Pierre et Brozzetti, Jacques (sous la dir.) – *Construction métallique et mixte acier-béton*, vol. 1 « Calcul et dimensionnement selon les Eurocodes 3 et 4 » ; vol. 2 « Conception et mise en œuvre » – Éditions Eyrolles, Paris, 1996

[4] *Construire avec les aciers* – ouvrage collectif, 2e éd. revue et augmentée, sous la dir. de Bertrand Lemoine – coll. « Techniques de conception » Éditions du Moniteur, Paris, 2002

[5] Daussy, Robert – *Guide pratique de charpente métallique* – Éditions Eyrolles, Paris, 1993

[6] Eekhout, Mick – *Structures tubulaires en architecture* – Éditions Cidect, Genève, 1994

[7] *Eurocode 3 et documents d'application nationale. Calcul des structures en acier* – Éditions Eyrolles, Paris, 1996

[8] *Eurocode 4 et documents d'application nationale. Conception et dimensionnement des structures mixtes acier-béton* – Éditions Eyrolles, Paris, 1996

[9] Fruitet, Louis – *Cours de construction métallique* – Éditions Dunod/UPA1, Paris, 1983

[10] Habermann, Karl J., Schulitz, Helmut C., Sobek, W. *Construire en acier* – Éditions Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2003 – Édition originale en langue allemande, Detail, Munich, 1999

[11] Hart, F, Henn, W & Sontag, H – *Structure acier - Bâtiments à étages* – Éditions Publimétal et SEPFI, Paris, 2e éd. 1986

[12] Hirt, Manfred A. et Crisinel, Michel – *Charpentes métalliques : Conception et dimensionnement des halles et bâtiments* – Traité de Génie Civil, vol. 11, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2001

[13] Hirt, Manfred A., Nussbaumer, Alain, Crisinel, Michel et Lebet, Jean-Paul – *Construction métallique. Bases de calcul et exemples numériques adaptés aux nouvelles normes* – Complément du Traité de Génie Civil, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2004

[14] Lemoine, Bertrand – *L'Architecture du fer. France : XIXe siècle* – Éditions Champs-Vallon, collection « Milieux », Paris, 1986

[15] Lescouarc'h, Yvon – *Initiation au calcul d'un bâtiment à structure en acier* – Éditions du CTICM, Saint-Rémy-les-Chevreuse, 1997

[16] Miettinen Esko, Ripatti Harri, Saarni Risto *Use of Steel in Housing Renovation* – The Finnish Constructional Steelwork Association, Helsinki, 1997

[17] *Light Steel-Framed Construction* – LSK 2004

[18] Miettinen Esko, Saarni Risto – *Use of Steel in house building* – The Finnish Constructional Steelwork Association, Helsinki, 2000

[19] Muttoni, Aurelio – *L'Art des structures. Une introduction au fontionnement des structures en architecture* –Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2004

[20] Roesch, Louis – *L'Acier, sa fabrication, ses propriétés, sa mise en œuvre, ses emplois* – Éditions Otua, La Défense, 2003

[21] Schittich, Christian – *Building Skins : Concepts, Layers, Materials* – Edition Detail, Munich, Birkhäuser, Bâle, 2001

[22] Seitz, Frederick – *L'Architecture métallique au XXe siècle : architecture et « savoir-fer »* – Éditions Belin, Paris, 1995

[23] Slessor, Catherine – *Eco-Tech: Sustainable Architecture and High Technology* – Thames and Hudson, London, 1997

[24] Zacek, Milan – *Construire parasismique* – Éditions Parenthèses, Marseille, 1996

Documentations techniques

Arcelor / www.constructalia.com
Arcelor Sections Commercial / www.asc.arcelor.com
Haironville / www.haironville.com
Lafarge plâtre / www.lafarge-platres.com
PAB / www.pab.com
Ugine & ALZ / www.ugine-alz-construction.com

Sites d'information

www.acierconstruction.com
www.cticm.com
www.otua.org

Crédits iconographiques

A
Abbadie, Hervé : 87 (2), 90.
Apex : 108 (1).
Aranguren, Joxe : 48 (1).
Avenel, Éric : 80 (1), 88 (3).
B
Baltanás, A. L. + Sánchez, E. : 95 (3).
Boëgly, Luc/Archipress : 94 (2).
Bordaz, Marie-Claire : 49 (2).
Burt/Apex : 43 (3).
C
Charpentes métalliques : Conception et dimensionnement des halles et bâtiments [12] : 23 (2), 24 (1-3), 26 (1), 27 (2), 38 (2), 45 (2), 52 (1), 57 (1), 68 (1).
Chavanne, Patrick : 88 (4).
Cepezed : 61 (3, 5).
Construire avec les aciers [4] : 13 (1), 49 (3), 51 (1), 53 (1, 3, 5), 67 (1), 87 (1).
Construire en acier [10] : 12, 27 (1), 35 (1), 46 (2).
Construire parasismique [24] : 17 (1-3).
Construction mixte acier-béton, vol. 2 [3] : 46 (1, 6), 47 (3).
Cours de construction métallique [9] : 8 (1-3), 9 (1), 10 (2), 14 (2), 23 (1, 3), 35 (2, 3), 36, 42 (2 ,3), 43 (1, 2), 49 (1), 50 (2), 51 (4), 52 (2-4), 53 (2, 4), 81 (3).
Couturier, Stéphane/Archipress : 84.
D
Défossez, Joseph : 96, 97 (1-3), 98 (1-3), 99 (1, 2), 100, 101 (1, 2), 102 (1, 2), 103 (1-4), 104 (1-4), 105 (1-4).
Denancé, Michel/Archipress : 65 (1), 79 (2)
DR : 7 (1, 2, 3), 9 (2, 3), 11 (2), 16 (1), 18, 26 (2), 33 (2), 34 (2), 37 (2), 39 (3), 41 (4), 42 (1), 44 (1-4), 45 (1, 3), 46 (3), 47 (1), 48 (4), 50 (1, 3), 51 (2, 3), 54 (1), 55 (3), 56 (2), 57 (4, 5), 58 (1-4), 59 (2, 3), 60 (1, 2), 63 (2), 68 (3), 70 (3), 76, 77 (3), 78 (1), 79 (3), 80 (2), 83 (4), 85 (1-3), 86 (2), 87 (3), 88 (1), 91 (1), 94 (3), 106 (1, 2), 107 (1), 108 (2), 109 (2), 110.
Dubosc et Landowski : 30 (2), 32 (2), 56 (3, 4), 58 (6), 66 (1, 2), 72 (1), 74 (1, 2), 75 (1-4), 77 (1), 78 (2), 79 (1), 80 (3, 4), 83 (4), 86 (1).
F
Fessy, Georges : 31 (1), 40 (4).
G
Gaston Bergeret : 71 (2).
Guérin, G. : 87 (4).
H
Haironville : 64 (2), 71 (1, 3), 73 (1), 81 (1), 82 (1), 93 (1).
Hérault, Isabel et Arnod, Yves : 41 (5).
Herbin, Stéphane : 48 (2).
Hunt, Anthony Associates : 40 (3).
J
Jaffre, J. : 83 (3).
Jouannais, Emmanuel : 13 (2), 14 (1, 3), 15, 16 (2), 25 (1), 27 (3), 28, 29 (1, 2), 32 (3), 34 (4), 38 (1), 39 (1), 40 (1), 41 (1, 3), 46 (2), 54 (2), 63 (1), 67 (2).
Jouannais, Eve : 48 (3).
K
Kasper, G : 32 (1).
Keuzemkamp, Franz : 69 (1).
L
Lafarge plâtre : 86 (3, 4).
Lemoine, Bertrand : 25 (2), 30 (1), 33 (3), 34 (3), 47 (2), 77 (2), 89 (3).
M
Martius, Herbert : 93 (2).
Maurer, Paul : 89 (2), 107 (2).
Meister, Heidi : 9 (4).
Monthiers, Jean-Marie : 39 (4), 88 (2), 89 (2), 94 (1).
Monthiers, Vincent : 91 (2).
Morin, André : 95 (1).
N
Naux, Élisabeth et Poux, Luc : 89 (1).
P
PAB : 10 (1), 58 (5), 72 (2), 73 (2, 3), 81 (2).
Profil du futur : 10 (3).
Q
Quirot, Bernard et Vichard, Olivier : 64 (1).
R
Richters, Christian : 95 (2).
Ruault, Philippe : 34 (1).
S
Saillet, Érick : 39 (2).
Savary, Stéphane : 65 (2).
Shinken Chiku-Sha : 43 (4).
SMB : 41 (2).
SNCF AP-Arep : 11 (1).
Structure acier [11] : 27 (1), 31 (2), 33 (1), 37 (1), 40 (2), 55 (2), 69 (2, 3), 70 (1, 2).
Sucheyre, Dalhiette : 62 (1), 92.
T
Terrell Rooke Associés : 59 (1).
U
Ugine & ALZ : 82 (2), 83 (1, 2).
Z
Zekri, A : 106 (3).

Achevé d'imprimer février 2005
Dépot légal mars 2005
Imprimerie Victor Buck, Luxembourg

Collection *Mémentos acier*



L'acier est un matériau de construction universel, présent dans les bâtiments sous de multiples formes. Il s'adapte aux nécessités pour combiner liberté de création avec efficacité constructive. Il offre des possibilités uniques de grandes portées, de souplesse d'adaptation, de possibilités de combinaison avec les autres matériaux, de construction durable et recyclable.

Ce manuel présente de manière didactique et synthétique l'essentiel de ce qu'il faut savoir sur l'acier, ses performances mécaniques, sa mise en œuvre dans le domaine des structures, des planchers, des façades, des couvertures, des cloisons et des équipements intérieurs. Il souligne également les performances de l'acier en matière de durabilité et de sécurité incendie. Outil de conception simple et pratique, ce «Mémento acier», second ouvrage de la collection initiée par le groupe Arcelor, s'adresse aussi bien aux professionnels confirmés de l'acte de bâtir qu'aux étudiants.

Les auteurs

Marc Landowski architecte dplg, enseignant à l'école d'architecture de Bordeaux, associé de l'agence Dubosc et Landowski connue pour ses réalisations à dominante acier.
Bertrand Lemoine ingénieur diplômé de l'École polytechnique et de l'École nationale des ponts et chaussées, architecte dplg, enseignant à l'école d'architecture de Marne-la-Vallée, spécialiste de la construction métallique.

9 782952 331807

ISBN : 2-9523318-0-4
15 €